



Investigación aplicada e innovación

Volumen 12, 2018 Lima, Perú • ISSN 1996-7551

David Alonso Nájar Valdivia

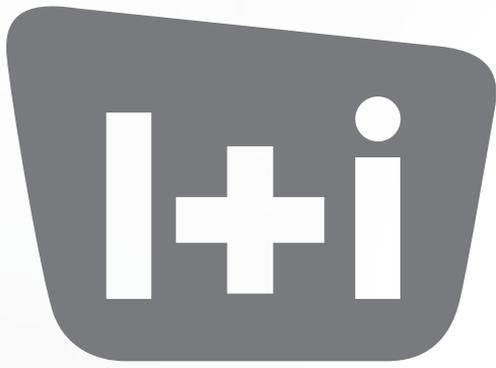
**Optimizando el
proceso de
construcción de
modelos de decisión
en el mantenimiento
industrial** por análisis de
confiabilidad predictivo y
dinamismo RCM
Pág. 4

Juan Carlos Bueno, Jaime Farfán,
José de la Puente, Luis Peña,
César Arce, Anthony Aróstegui,
Bregy Malpartida, Julio Valdivia-Silva,
José Pérez-Lu, Miguel Egoavil,
Daniel Cóndor, Miguel Pinazo,
Juan Quezada

**Telemedicina en
cuidados paliativos:**
una aplicación que ayuda a
cuidadores y personal médico
Pág. 16

 **TECSUP**
Pasión por la Tecnología

www.tecsup.edu.pe
  



Investigación aplicada e innovación

LE CO ND I ND

Optimizando el proceso de construcción de modelos de decisión en el mantenimiento industrial por análisis de confiabilidad predictivo y dinamismo RCM

.....David Alonso Nájjar Valdivia

4

Telemedicina en cuidados paliativos: una aplicación que ayuda a cuidadores y personal médico

.....Juan Carlos Bueno, Jaime Farfán,

.....José de la Puente, Luis Peña,

.....César Arce, Anthony Aróstegui,

.....Bregy Malpartida, Julio Valdivia-Silva,

.....José Pérez-Lu, Miguel Egoavil,

.....Daniel Córdor, Miguel Pinazo,

.....Juan Quezada

16

Control neurodifuso de un péndulo invertido rotacional

.....Luis Enciso Salas,

.....Miguel Ángel Chávez Luna

26

Modelado borroso de tipo Takagi Sugeno y control predictivo de una planta de nivel

.....Julio Mosaja, Oswaldo Moreno,

.....Andrés Morocco, Hernando Prada

34

Obtención de la función de transferencia de un motor de corriente continua, basada en mediciones experimentales.

.....José Lazarte

46

Evaluación de activos: de la teoría a la práctica

.....José Rojas

56

Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional

.....Roberto Delgado

.....José Lazarte

68

Caracterización de cuerdas de ichu y de agave usados en estructuras colgantes

.....César Nunura, César Lecaros,

.....Roberto Delgado

80

Sistema electrónico de alerta y captura de roedores para el sector agroindustrial

.....Iván Jeri, Alfredo Rodríguez,

.....Natalie Reynaga, Jessica Villar

86

Pizarras Digitales Interactivas: ¿Cuáles son los niveles de satisfacción, necesidades y contribuciones desde la mirada de los docentes?

.....David Laura, Luis Almanza

98

Director: Narciso Arméstar Bruno, *Tecsup*.

Editor en jefe: Jorge Bastante Pazos, *Tecsup*.

Comité Editorial: Aurelio Arbildo, *Inducontrol*, Carlos Hernández, *Alicorp*; Elena Flores, *Cementos Pacasmayo*; Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*.

Coordinadora Editorial: Celene Alata Carhuavilca, *Tecsup*.

Colaboradores: Arturo Rojas, Carlos Córdova Ccollana, Henry Gómez, Hernando Prada, Iván Díaz, Javier Lizárraga, José De Los Ríos, Juan Musayón, Karen Llacho, Ramón Robalino, Rocío Balbín, Samuel Charcas.

Correctora de estilo: Laura Gómez Rojas

Diagramación: Tarea Asociación Gráfica Educativa.

Impresión: Tarea Asociación Gráfica Educativa, Pasaje María Auxiliadora 156-164, Lima 5, Perú. Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706.

Tiraje: 2 000 ejemplares.

Publicado en noviembre de 2018

Tecsup:

Sede Norte:

Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú.

Sede Centro:

Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima, Perú.

Sede Sur:

Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú.

Publicación Anual:

Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

Publicación Indexada en Latindex

Suscripciones:

investigacioneinovacion@tecsup.edu.pe

Nota:

Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.



Revisa todas las ediciones de la Revista I+i en versión digital

EDITORIAL

Estimados lectores:

Con mucho orgullo, me permito presentar, en esta oportunidad, la edición número doce de nuestra revista. Los artículos presentados giran alrededor de temas de aplicación en la agricultura, la medicina, la educación, los materiales y la gestión del mantenimiento y de activos, por mencionar los tópicos más relevantes. Todas estas cuestiones han sido abordadas por investigadores de Tecsup y externos.

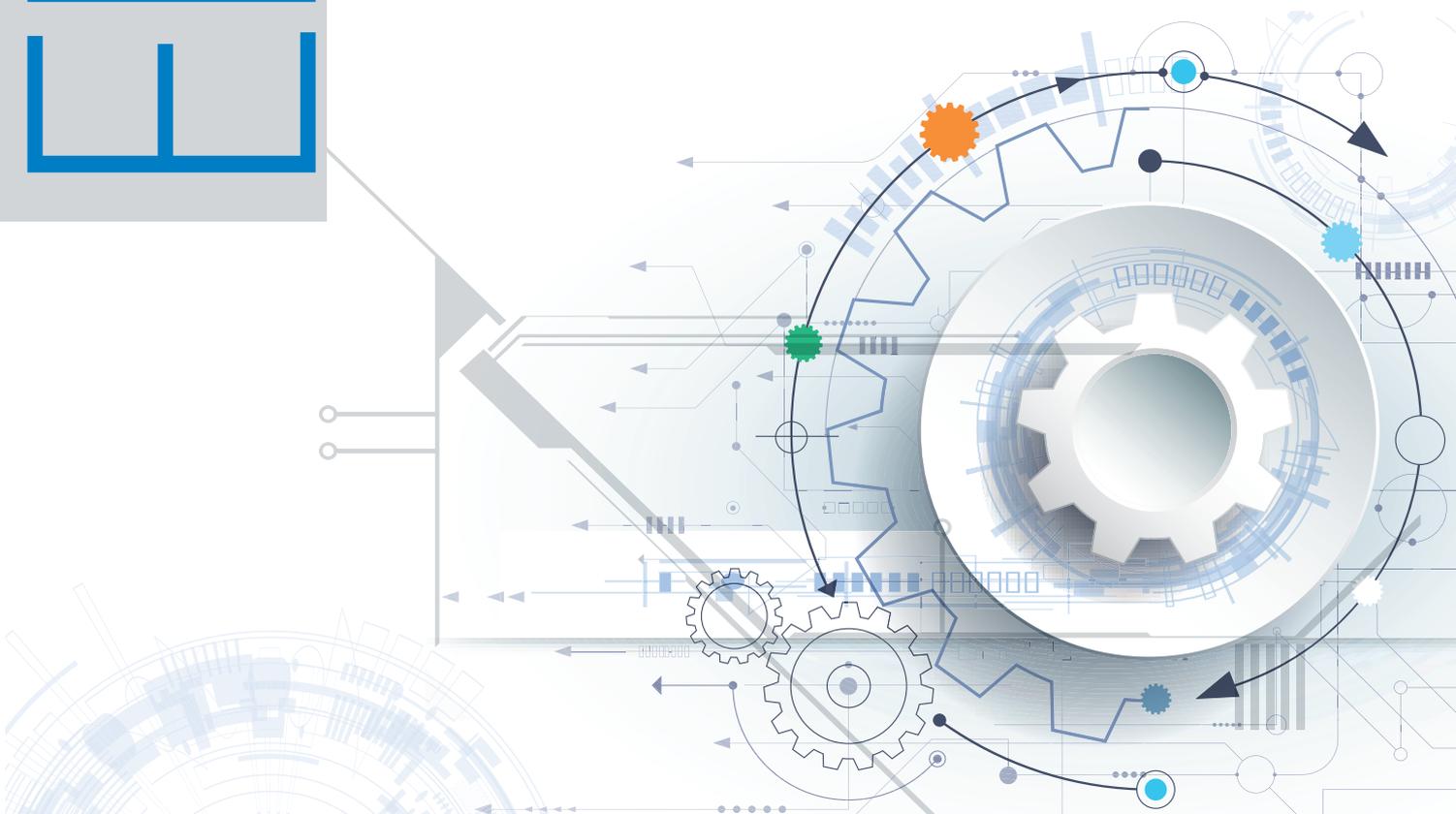
Una vez más, comprobamos la importancia de la investigación aplicada con apoyo de la tecnología para la solución de problemas en la industria. Este ejercicio mantiene la conexión de la academia con la industria y es un círculo virtuoso que, finalmente, alimenta la formación de nuevos profesionales conectados con la realidad de las distintas áreas económicas.

Agradezco a todos los autores por su esfuerzo y dedicación para trabajar cada uno de los tópicos. Esta es la oportunidad para reconocer también al equipo que hizo posible la edición de este nuevo número por su entusiasmo y empeño en todo el proceso de producción y edición para obtener un producto de calidad.

Estoy seguro de que, como en números anteriores, esta edición cumplirá con sus expectativas. Espero también que, si alguno de los temas es de su interés particular, contacte con los autores para fortalecer el ecosistema de investigación aplicada alrededor de la *Revista I + i*.

Narciso Antero Arméstar Bruno

Director



Sin análisis de confiabilidad, es imposible mejorar sistemáticamente las políticas de mantenimiento y, sin una muestra de información de calidad, la toma de decisiones tras el análisis de confiabilidad resultará imprecisa.



Optimizando el proceso de construcción de modelos de decisión en el mantenimiento industrial por análisis de confiabilidad predictivo y dinamismo RCM

Optimizing the Construction Process of Industrial Maintenance Decision Models by using Predictive Reliability Analysis and RCM Dynamism

RESUMEN

Un proceso estocástico, a diferencia de un proceso determinístico, en vez de tener una posible realidad de cómo un proceso puede evolucionar con el tiempo. Posee una evolución futura indeterminada (proceso aleatorio). Esta incertidumbre está descrita por las distribuciones de probabilidad.

Los eventos de falla, en un activo físico, obedecen justamente a un orden aleatorio basado en una distribución de probabilidad, la misma que es habitualmente representada en los análisis de confiabilidad (RA) como herramienta para la gestión del mantenimiento, cuyos resultados propiciarían criterios de decisión que permitan optimizar sus estrategias.

Los análisis de confiabilidad, empleados en la actualidad, recurren a las dimensiones de datos de edad y de probabilidad de falla para disponer de una representación gráfica bidimensional (función de densidad de probabilidad de falla, PDF) que confiera una relación entre ellas y proponga resultados que alimenten el criterio de la toma de decisiones. Sin embargo, si el fin es optimizar decisiones de gestión del mantenimiento, es necesario asegurar un registro de todas aquellas variables significativas disponibles para generar muestras sólidas y coherentes a fin de construir modelos precisos de decisión, a partir de un análisis de confiabilidad multidimensional.

La propuesta que se presenta declara que la correcta consistencia de una muestra parte del grado de dinamismo con el que el cuerpo de conocimiento RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad) se vincula con la gestión diaria de las órdenes de trabajo bajo CMMS (sistema computarizado de gestión del mantenimiento) o EAM (sistema de gestión de activos empresariales), los mismos que no son pensados para favorecer un análisis de confiabilidad.

Las órdenes de trabajo propiciarán datos completos de edad e instancias de actualización para los registros FMEA (análisis de modos y efectos de fallas) a medida que se presenten nuevas

ocurrencias de modos de falla. Además de la contribución de los programas CBM (mantenimiento basado en la condición) que añadirán a la muestra, las variables relevantes predictivas sobre los modos de falla que ocurren y que habitualmente se encuentran omitidas o pobremente inmiscuidas en la gráfica PDF bidimensional y, por tanto, tienden a no ser contenidas en los análisis de confiabilidad regulares.

La calidad de la muestra se asegurará y se preparará rutinariamente con los atributos de edad y condición que correspondan para potencializar el modelamiento predictivo con resultados satisfactorios sobre los pronósticos probabilísticos, y que respalden las estrategias de mantenimiento a emplear en el momento y componente apropiados, a fin de garantizar un incremento del rendimiento sobre la inversión (ROI) de las plantas industriales.

ABSTRACT

A stochastic process, unlike a deterministic process, instead of having one possible reality of how a process can evolve over time, has an indeterminate future evolution. This uncertainty is described by the probability distributions.

Failures events in a physical asset follow a random order based on a probability distribution, which is often represented in the reliability analysis as a tool for the maintenance management, whose results would offer decision criteria in order to optimize maintenance strategies.

Current reliability analysis (RA) employ data dimensions based on age and failure probability in order to obtain a two-dimensional graphic representation (probability density function of failure, PDF) that provides a connection between them and suggesting results that could improve the making-decision criteria. However, if the plan is to optimize maintenance



Palabras clave

Mantenimiento centrado en la confiabilidad, análisis de confiabilidad, sistema computarizado de gestión del mantenimiento, sistema de gestión de activos empresariales, mantenimiento basado en la condición, modelo de riesgos proporcionales.

Key words

Reliability Centered Maintenance (RCM), Reliability Analysis (RA), Computerized Maintenance Management System (CMMS), Enterprise Asset Management (EAM), Condition Based Maintenance (CBM), Proportional Hazards Model (PHM)

management, it is necessary to assure a record of all the significant available variables to generate solid and coherent samples, in order to build up precise decision models beginning with a multidimensional reliability analysis.

The following proposal states that the proper consistency of a sample initiates with the degree of dynamism which the body of knowledge RCM (Reliability Centered Maintenance) links to the daily work orders management, under the CMMS (Computerized Maintenance Management System) or EAM (Enterprise Asset Management), which are not thought to be in favor of a reliability analysis.

Work orders will be converted in definition stages for the life cycles and for the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) records upgrading as new failure modes occurrences appear. In addition to CBM (Condition Based Maintenance) strategies complicity, which will add in the sample relevant predictable variables over the occurred failure modes, which usually are omitted or poorly involved in the two-dimensional PDF graphic, and therefore, are not often considered in the common reliability analysis.

Quality of the sample is therefore assured and routinely prepared with the age and condition attributions, which gives a potential predictive model with satisfactory results about the probabilistic forecast, being able to sustain the maintenance strategies employed at the appropriate time and proper component, in order to guarantee, the return on investment (ROI) growth in the industrial plant.

Es común que la calidad de la información ingresada en las órdenes de trabajo sea insuficiente para construir modelos de decisión predictivos. Es común que el cuerpo de conocimiento inicial RCM, generado a partir del consenso de los mejores recuerdos y experiencias de los analistas involucrados en ese momento, tienda a ser inexacto y estático. Muchas veces, la esencia de su pensamiento distorsionada por la ambigüedad adoptada por los sistemas CMMS/EAM en su estructura de codificación de ciclos de vida.

Dado el dinamismo constante de la producción, de la innovación tecnológica y del crecimiento de la experiencia en el mantenimiento, resulta fundamental mantener la jerarquía RCM dinámica y a la vista del proceso diario de órdenes de trabajo, de modo que las estrategias de mantenimiento se revisen de forma continua para acercarse cada vez más a la realidad del contexto operacional actual. Es decir, establecer un vínculo permanente entre la teoría y la práctica, donde es la teoría dispuesta en la base de conocimiento inicial RCM y definida por la descripción precisa de eventos probables, mientras que la práctica, comprende al sistema de órdenes de trabajo, constituyendo los eventos ocurridos en la realidad y las tareas proactivas o reactivas de mitigación que se emplearon. Esta conexión logra una correlación analítica que da como resultado una práctica mejorada para alcanzar la confiabilidad a partir de los datos de edad.

Es habitual, además, que dentro de las políticas de prevención de muchas organizaciones de mantenimiento, las decisiones de intervenir por reemplazos generen un gran desaprovechamiento de vida útil en el activo intervenido. Y si, bajo esta filosofía, tratáramos a un activo costoso, la decisión de una intervención frecuente por CBM resultará una mejor opción que la de un reemplazo regular, puesto que permite comprender mejor el comportamiento de su «salud» para tomar decisiones TBM (mantenimiento centrado en el tiempo) oportunas, traduciendo su resultado en una reducción de los costos globales e incremento de vida útil.

Resulta, entonces, fundamental optimizar la toma de decisiones bajo un enfoque de estimación de la probabilidad condicional de falla que combine datos de edad y EHM a través de un modelo de riesgos proporcionales. Por tanto, aquellas variables CBM que puedan guardar relación con los modos de falla que ocurren no deben ser ignoradas en los modelos probabilísticos de predicción.

Sin análisis de confiabilidad es imposible mejorar sistemáticamente las políticas de mantenimiento, y sin una muestra de información de calidad, la toma de decisiones tras el análisis de confiabilidad resultará imprecisa.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en una organización de mantenimiento debería enfocarse en centrar sus esfuerzos para convertir su información en conocimiento, a fin de construir modelos de decisión que respalden la integridad de un activo físico bajo una gestión efectiva del riesgo en términos de confiabilidad. Tal conocimiento toma como origen la generación de muestras de información completas y precisas en base a los datos, los que alimentarán las bases para la optimización de la toma de decisiones en el mantenimiento.

Ante esto, surge la necesidad de establecer una estrategia de recolección de datos de fuentes de información diversas para propiciar la muestra:

- Información EHM (monitoreo de la salud del equipo), CBM: datos de condición.
- Información de órdenes de trabajo – CMMS/EAM: datos de edad.
- Información de operación (PCS, DCS, SCADA, etc.).
- Base de conocimiento RCM.
- Información del negocio: datos de costos.

Tanto los datos de condición como los datos de costos, son habilitados por tecnologías de recolección precisas que han alcanzado notable madurez a lo largo de los años. Sin embargo, los datos de edad, persistentemente inconsistentes e imprecisos en las órdenes de trabajo (CMMS/EAM), no respaldan al análisis de confiabilidad para la aplicación de algoritmos de pronóstico de eventos de falla.

FUNDAMENTOS

Fuentes de información

La gestión del mantenimiento debe ser soportada por informaciones diversas que converjan en la toma de decisiones. Como fuentes de información, se rescatan las siguientes:

A. Datos de edad: Información que determina el comienzo y el fin de un ciclo de vida. Define la característica de la ocurrencia de un modo de falla.

- a. Eventos de **falla funcionales** (pérdida de la función de un activo).
- b. Eventos de **falla potenciales** (estado previo a la falla funcional).
- c. Eventos de cese por **suspensiones** (prevención de un modo de falla mayormente).

B. Datos EHM: Información relevante de condición en relación a los modos de falla de interés.

a. Inspecciones.

b. Datos del proceso de los sistemas de control.

- i. Externas:** Esfuerzos externos con posibles consecuencias de fallas funcionales.
- ii. Internas:** Propias de la degradación de su condición. Detectan la evidencia de una falla potencial.

C. Eventos no rejuvenecedores: Información de tareas menores de mantenimiento que no añaden «vida» al activo, pero alteran los datos EHM durante su recopilación.

D. Datos de costos: Información monetaria en relación a la implicancia de un evento de fallo o de prevención.

Modelos de predicción de confiabilidad (distribución Weibull)

Se basa en un método analítico de eventos de falla que proporciona predicciones de confiabilidad además del nivel de confianza con el cual se podían emplear tales predicciones. Sus indicadores principales son los siguientes:

- **f(t):** Función de densidad de probabilidad de falla (PDF), dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp - \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \tag{1}$$

- **F(t):** Función de distribución acumulada de probabilidad de falla (CDF), dada por:

$$F(t) = 1 - \exp - \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \tag{2}$$

- **h(t):** Función del riesgo o tasa de fallas (probabilidad condicional de falla), dada por:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{3}$$

Donde las variables β , η , y t corresponden al parámetro de forma, al parámetro de escala y a la edad de desgaste respectivamente.

Optimización TBM (modelamiento de costos)

La variable t_p refiere al tiempo en el cual una intervención preventiva se lleva a cabo óptimamente, cuyo valor resultaría en el aumento de la rentabilidad del negocio, costos esperados: bajos. Por tanto, conocerlo resultaría favorable.

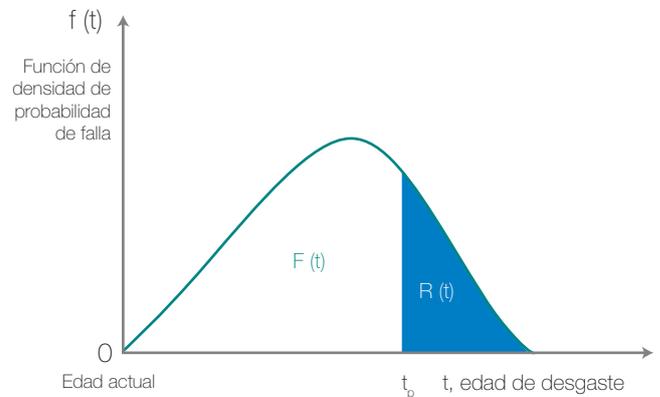


Figura 1. Función de la densidad de probabilidad de falla. Áreas de probabilidad de falla acumulada y confiabilidad. Fuente: Elaboración propia.

$$C_t = C_R R(t_p) + C_F [1 - R(t_p)] \tag{4}$$

$$t_t = t_p R(t_p) + t_f [1 - R(t_p)] \tag{5}$$

$$\frac{C_t}{t_t} = \frac{C_R R(t_p) + C_F [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_0^{t_p} t_f(t) dt} \tag{6}$$

Donde las variables C_t , C_r , C_f corresponden al costo esperado, al costo de una intervención preventiva y al costo de falla respectivamente. La misma referencia se da sobre los tiempos t_t , t_p , t_f .

Modelo de riesgos proporcionales (Cox PHM) y proceso no homogéneo de modelamiento de tiempos de falla (Markov)

Cox PHM amplía la distribución Weibull para cubrir la realidad de las variables EHM (programas CBM). Procedimiento para estimar la probabilidad de falla de un activo físico no solo bajo un criterio de edad, sino también bajo un criterio de condición. Dado por:

$$h(t, Z(t); \beta, \eta, \gamma) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp \{ \sum_{i=1}^m \gamma_i Z_i(t) \} \tag{7}$$

Donde las variables $Z_i(t)$ y γ_i corresponden a la variable de condición monitoreada por CBM en un instante t y al parámetro vector que declara el grado de incidencia de la variable de condición sobre la función del riesgo respectivamente. Mientras que Markov modela la probabilidad de transición de los vectores de las variables EHM de un estado a otro (matriz de transición de probabilidad).

METODOLOGÍA

Claramente, es un gran acierto para una organización decidirse por CBM, ¿quién no busca maximizar la vida útil de un activo antes de generarle indisponibilidad por estrategias TBM muy conservadoras? Sin embargo, conducir tal deseo hacia un efectivo programa CBM para intervenciones oportunas no es tarea fácil. Puede resultar dificultoso identificar aquellas variables EHM más significativas e interpretar su influencia sobre la vida útil remanente (RUL). Adicional a ello, está la imprecisión de los sistemas CMMS/EAM en satisfacer muestras consistentes con los requerimientos necesarios de datos de edad, lo que conlleva al fracaso por alcanzar algoritmos de pronóstico de decisión en los planes de mantenimiento. Sin embargo, identificadas las variables de condición correctas y los datos de edad bien definidos, se podrá establecer con precisión decisiones de intervención TBM buenas y oportunas sobre el activo en estudio bajo los siguientes criterios:

- Intervención inmediata dada su condición crítica.
- Intervención planificada dentro del periodo que sigue a la inspección CBM realizada, pero antes de la siguiente.
- Continuar operando hasta la próxima inspección CBM.

Además de la optimización de TBM por análisis de confiabilidad regular (edad vs. probabilidad de falla), Cox PHM refina aún más esta optimización a través de modelos predictivos de decisión soportados bajo una estructura que propicia la interacción entre los distintos niveles de jerarquía del Departamento de Mantenimiento. Esto se realiza a través de métricas *lagging* y *leading*, enfatizando sobre aquellas que refieran a la operatividad del día a día, donde el personal pueda influenciarlas (*leading*) para que respalden a las métricas organizacionales (*lagging*).

Jerarquía RCM real, actualización de su conocimiento y definición de datos de edad

El personal directamente relacionado con los planes de mantenimiento consolidará el conocimiento de las órdenes de trabajo que fueron cerradas sobre la jerarquía RCM, ya sea validando aquellos modos de falla declarados en su base de conocimiento inicial, modificándolos o agregando nuevos de acuerdo con lo ocurrido en campo. Es decir, de observar divergencias entre la realidad y el conocimiento inicial RCM, se actualizará este último al escenario real. Esto permitirá al RCM representar el conocimiento colectivo para justificar planes de mantenimiento que representen estrategias de mitigación que se ajusten a la realidad y sirvan de premisa al planificar futuras órdenes de trabajo.

Downtime Administration System (DAS)

Fleet: ALL State: ALL From: To Search Clear + Add

Code	Equipment	Category	Started on	Closed on	Fleet	Description of Symptoms	State	Actions
LrcmG1Ex4b	LRCM_G1	DEFAULT	05/24/2017 12:05 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Insufficient cooling	Reparing	⏪ ⏩
LrcmG1Ex4a	LRCM_G1	DEFAULT	05/24/2017 12:00 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Insufficient cooling	Aviso de Entrega	⏪ ⏩
LrcmG1Ex4	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:17 PM	05/11/2017 05:30 PM (CLOSED SUCCESSFULLY)	Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	AC not cooling.	Reparando	⏪ ⏩
LrcmG1Ex3	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:08 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Found a fuel hose with minor wear.	Reparando	⏪ ⏩
LrcmG1Ex2	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:00 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Found partially worn fuel hose. About to fail.	Reparing	⏪ ⏩
LrcmG1Ex1	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 01:48 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Shovel arm does not lift	Reparando	⏪ ⏩
WOA0005	EQ_TST_05	DEFAULT	03/19/2015 03:48 PM		HVAC Chilled Water Plant	TEST WORK ORDER NUMBER 5	Esperando Respuesta	⏪ ⏩
WOY0001	EQ_TST_04	DEFAULT	01/29/2015 11:38 PM		HVAC Chilled Water Plant	TEST WORK ORDER NUMBER 4	Esperando Respuesta	⏪ ⏩

Figura 2. Vinculación de una orden de trabajo sobre la jerarquía RCM.

Fuente: MESH software.

MESH software es un sistema computarizado de gestión efectiva de la información y el conocimiento del mantenimiento a fin de extraer muestras precisas y de calidad para análisis de confiabilidad. Vincula permanentemente a los sistemas de órdenes de trabajo (CMMS/EAM) con la base de conocimiento RCM.

Dada la forma en cómo se registran las órdenes de trabajo en los sistemas CMMS/EAM, la consistencia de la información de los datos de edad para la muestra que se pretende no podría ser generada desde esta instancia, por lo que es necesario

referirse a la base de conocimiento RCM. Esta vinculación de conocimientos (CMMS/EAM y RCM) define sobre el modo de falla en análisis (orden de trabajo), un tipo de evento de fin como de inicio.



Figura 3. Definición de eventos de fin de modos de falla.
Fuente: MESH software.

Dashboard de KPIs, mejoras de conocimiento y estimación simple de la confiabilidad

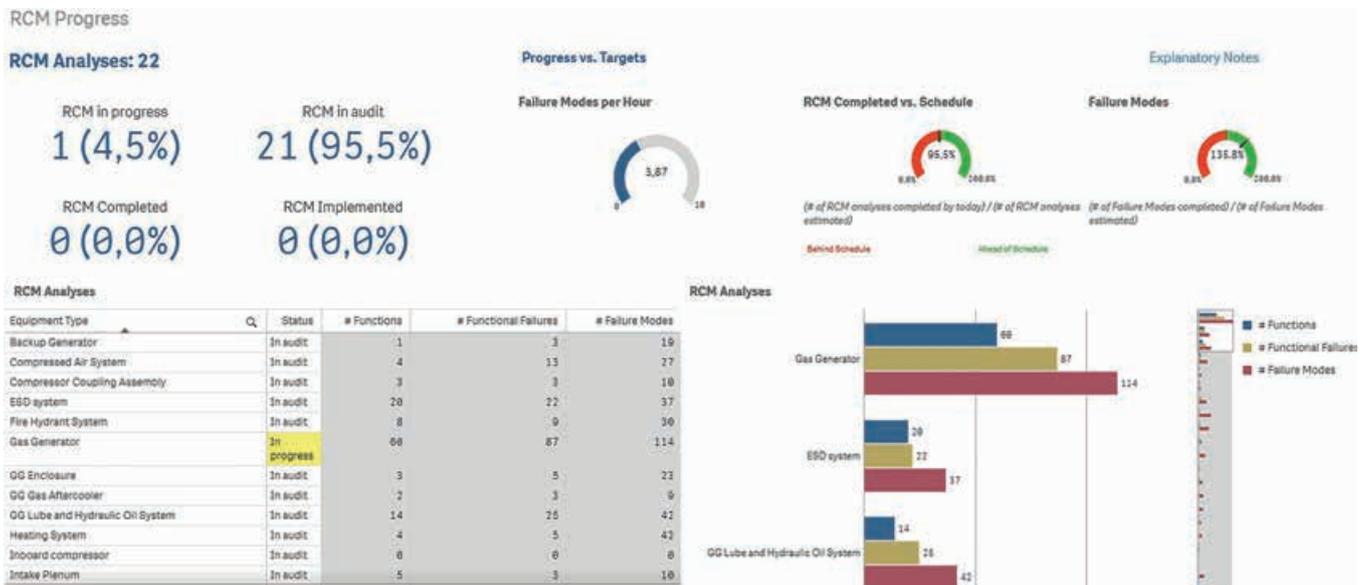


Figura 4. Cuadro de mando integral de desempeño RCM.
Fuente: MESH software.

Dado que el cuerpo de conocimiento RCM se encuentra entre las herramientas intelectuales con mayor valor en la gestión de activos dentro de una organización, su crecimiento sistemático debe ser monitoreado y dispuesto a todo el personal

correspondiente a través de un cuadro de mando integral. Sus métricas resaltarán con precisión las debilidades de nuestra política de mantenimiento y fomentarán acciones de control para optimizar su gestión.



Figura 5. Estimación simple de la confiabilidad desde la jerarquía RCM.
Fuente: MESH software.

Un panorama rápido desde la forma más básica de confiabilidad es revelado desde la base de conocimiento RCM a través de su MTBF (tiempo promedio entre fallas). El conteo del número de instancias existentes de un modo de falla en cuestión en un tiempo transcurrido, definido por el usuario, favorece a este indicador. Panorama que, además, validará los datos para técnicas avanzadas de confiabilidad y modelamiento predictivo.

Preparación de la muestra y análisis de confiabilidad avanzado

Los eventos no rejuvenecedores no deben ser ignorados, pues confundirá el análisis al asumir que la condición de un activo ha mejorado de alguna manera, no se conoce la razón, pero mejoró. Estos eventos deben tenerse en cuenta al elaborar un análisis predictivo correlacionado con la probabilidad de falla. Su identificación ignorará esas mejoras «artificiales» de la condición monitoreada y refinará el modelamiento de análisis predictivo reduciendo la desviación estándar en la estimación de la vida útil remanente (RULE).

Una vez con los datos de edad correctamente definidos y completos, se le sobrepondrán aquellas variables EHM que guarden un patrón precedente de influencia significativa sobre los eventos de falla potenciales y funcionales. Esta muestra de información combinada representa la fuente de entrada para el proceso Cox PHM, y tras el resultado de su análisis, la consecuente toma de decisiones optimizada.

El proceso Cox PHM - Markov cuantificará el riesgo combinado, extendiendo sobre la edad aquellas variables EHM influyentes. Esta influencia logra medirse por su grado de significancia, es decir, de cuan bien se encuentran estadísticamente relacionadas con el modo de falla bajo análisis.

La sinergia de estas etapas permite, como aporte, lo siguiente:

- Registrar, claramente, datos de edad definiendo su tipología de ciclo de vida respecto a un modo de falla en análisis al momento de cerrar una orden de trabajo.
- Retroalimentar, dinámicamente, la base de conocimiento inicial RCM a través de un permanente vínculo con las órdenes de trabajo cerradas, con el fin de evaluar cualquier

discrepancia entre la jerarquía inicial RCM y la realidad observada con respecto a los modos de falla ocurridos, sus efectos, consecuencias y tareas de mitigación (conocimiento RCM coincidente con la realidad).

- Capturar variables de valor predictivo influyentes sobre los modos de falla en análisis y que infieran directamente sobre el modelo de riesgo.
- Propiciar muestras de información sólidas y completas.
- Aplicar técnicas avanzadas de análisis de confiabilidad.
- Referir a la base de conocimiento RCM no solo al cerrar las órdenes de trabajo, sino también cuando estas se planifiquen, convirtiendo a la jerarquía RCM en fuente fidedigna para los planes de mantenimiento futuros para hacer frente óptimamente a los modos de falla, sus efectos y sus consecuencias.

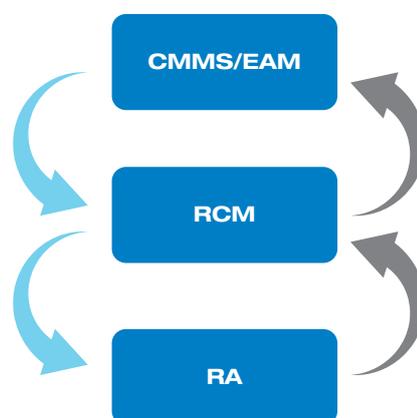


Figura 6. Interacción sistemas CMMS/EAM, RCM y RA.
Fuente: Elaboración propia.

Aporte que trasciende en premisas fundamentales para conducir la construcción de modelos predictivos de decisión en la gestión estratégica del mantenimiento. Gráficamente:

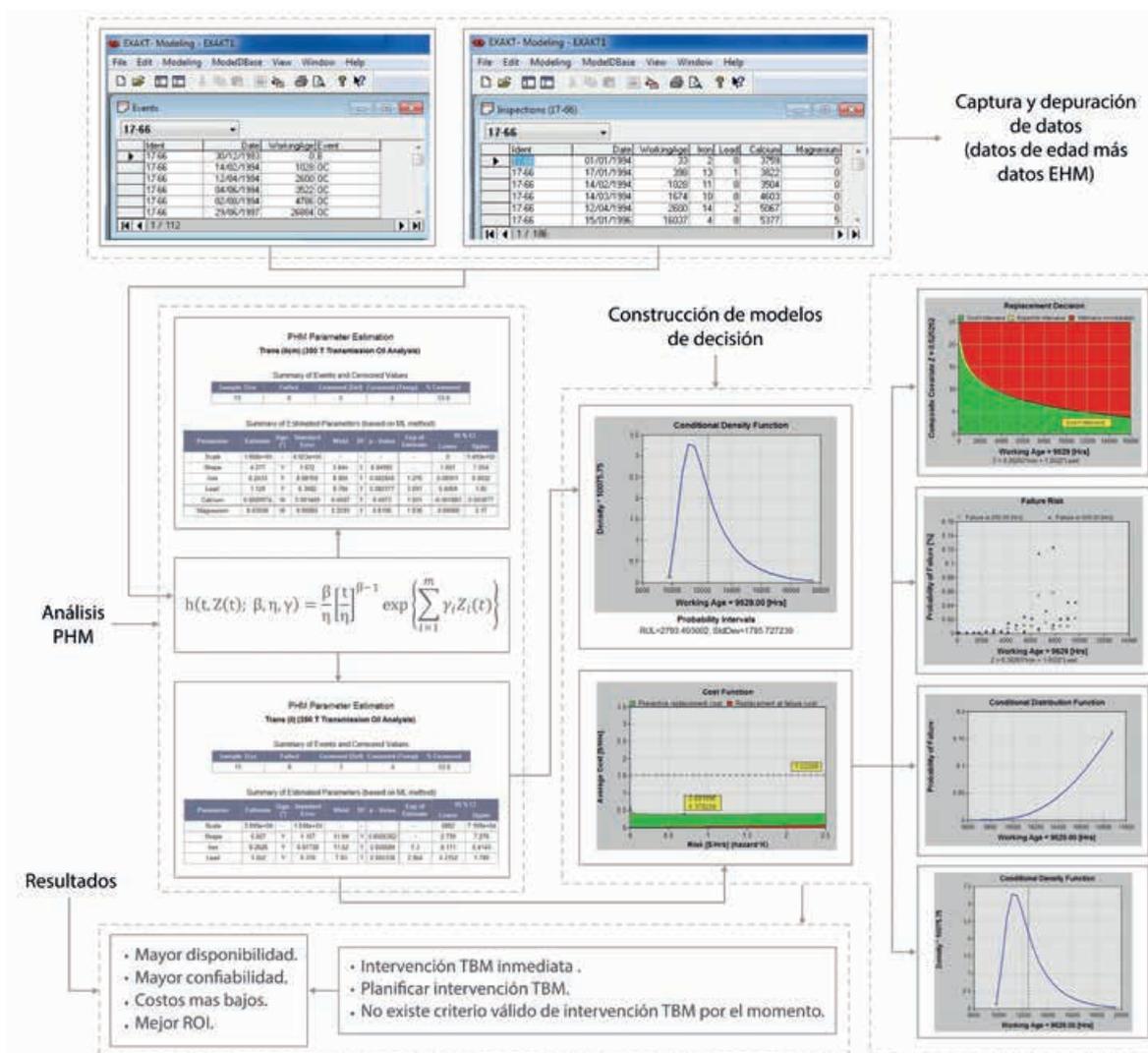


Figura 7. Propuesta de la estructura de construcción de modelos predictivos de decisión. Técnica CBM: análisis de aceite. Variables EHM (ppm): Fe, Pb, Ca y Mg. Fuente: Elaboración propia.

PHP Parameter Estimation Trans (ilcm) (350 T Transmission Oil Analysis)

Summary of Events and Censored Values

Sample Size	Failed	Censored (Def)	Censored (Temp)	% Censored
13	6	3	4	53.8

Summary of Estimated Parameters (based on ML method)

Parameter	Estimate	Sign. (*)	Standard Error	Wald	DF	p. Value	Exp of Estimate	95% CI	
								Lower	Upper
Scale	1.608e+05	-	4.023e+05	-	-	-	-	0	9.493e+05
Shape	4.277	Y	1.672	3.844	1	0.04992	-	1.001	7.554
Iron	0.2433	Y	0.08155	8.904	1	0.002845	1.276	0.8351	0.4032
Lead	1.129	Y	0.3682	9.394	1	0.002177	3.091	0.4069	1.85
Calcium	0.0009974	N	0.001469	0.4607	1	0.4973	1.001	-0.001883	0.003877
Magnesium	0.03506	N	0.06885	0.2593	1	0.6106	1.036	-0.09988	0.17

Tabla 1. Evaluación PHM de la muestra. EHM: Variables relevantes para el algoritmo predictivo: Fe y Pb. Variables irrelevantes: Ca y Mg. Fuente: EXAKT software.

**PHP Parameter Estimation
Trans (ii) (350 T Transmission Oil Analysis)**

Summary of Events and Censored Values

Sample Size	Failed	Censored (Def)	Censored (Temp)	% Censored
13	6	3	4	53.8

Summary of Estimated Parameters (based on ML method)

Parameter	Estimate	Sign. (*)	Standard Error	Wald	DF	p. Value	Exp of Estimate	95% CI	
								Lower	Upper
Scale	3.899e+04	-	1.638e+04	-	-	-	-	6882	7.109e+04
Shape	5.007	Y	1.57	11.59	1	0.0005352	-	2.739	7.276
Iron	0.2626	Y	0.07738	11.52	1	0.000689	1.3	0.111	0.4143
Lead	1.052	Y	0.376	7.83	1	0.005138	2.864	0.3152	1.789

Tabla 2. Reajuste de la evaluación PHM de la muestra. Variables EHM relevantes: Fe y Pb.
Fuente: EXAKT software.

EXAKT software es una potente herramienta computacional para realizar análisis de confiabilidad. Su análisis extiende las dimensiones de un análisis de confiabilidad basado en la edad, al incluir datos de monitoreo de condición. Su objetivo es el de predecir eventos de falla y optimizar las estrategias del mantenimiento basado en la condición (CBM).

Un valor del parámetro de forma (β) elevado puede significar lo siguiente:

- Las variables EHM no guardan mucho valor predictivo sobre el modo de falla en análisis (más dependientes de la edad).
- Existen variables EHM influyentes, pero no monitoreadas (hay mejores candidatas).
- Existencia de inconsistencia en la identificación del modo de falla (forma de su registro en los sistemas CMMS/EAM).
- Mala distinción entre eventos de edad (suspensiones confundidas con fallas).

En cambio, un bajo valor del parámetro de forma nos indicará que el programa CBM empleado es efectivo, las variables EHM predominarán en criterio sobre la probabilidad de falla y, por

lo tanto, las decisiones tomadas del modelamiento predictivo basadas en CBM serán óptimas.

Los resultados que se generarían tras el análisis PHM propiciarán dos criterios de decisión:

- Tomar decisiones bajo un criterio de la probabilidad de falla. Es decir, tomar decisiones en función al RUL, el mismo que se encuentra sujeto al grado de dispersión de sus datos, dispersión relacionada de manera directa y proporcional con la desviación estándar y el parámetro de escala, pero con influencia inversa sobre el nivel de confianza para valerse del RUL para la toma de decisiones. Las decisiones de mantenimiento que respaldan este criterio son comunes cuando los costos que incurren correr hasta la falla no se pueden estimar o son desconocidos, como eventos de falla que involucran serias consecuencias HSE (salud, seguridad y medioambiente).

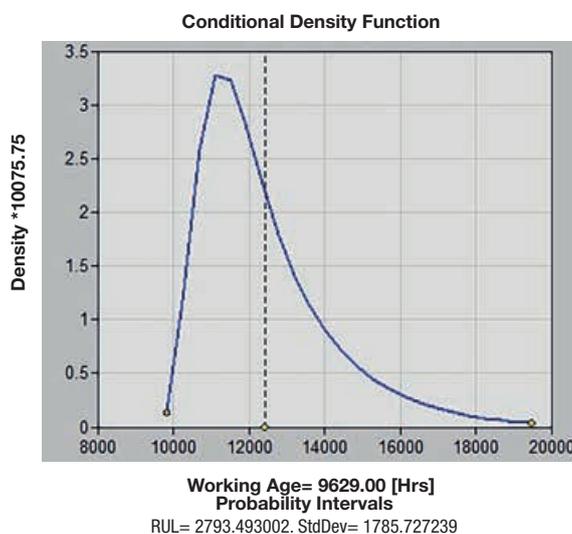


Figura 8. Función de densidad de probabilidad de falla. RUL: 2793.49 horas. Edad de operación actual: 9629.00 horas. σ : 1785.73 horas.
Fuente: EXAKT software.

La desviación estándar es un excelente indicador del desempeño predictivo en una estrategia CBM. Es un indicador indirecto de la precisión de datos de edad reportados en las órdenes de trabajo, por lo que servirá para evaluar el manejo de la información de un sistema CMMS/EAM.

- Decidir bajo criterios de rentabilidad y probabilidad de falla. Es decir, tomar decisiones basadas en los datos de edad y las variables significativas EHM (RUL), y vincularlas con los costos globales de mantenimiento (datos del negocio) para alcanzar un nivel óptimo del riesgo que garantice la más alta disponibilidad a un riesgo que resulta alcanzando el menor costo de mantenimiento. Este criterio soporta decisiones relacionadas con las consecuencias operacionales y no operacionales de un modo de falla, cuyo impacto económico puede ser calculado. Su modelo de decisión está representado por la suma ponderada de las variables EHM respecto al a la edad, identificando la mejor decisión oportuna de intervención TBM.



Figura 9. Función costo. Costo global promedio vs. riesgo. Fuente: EXAKT software.

	Cost [\$/Hrs]	Preventive Repl. Cost [\$/Hrs]	Failure Repl. Cost [\$/Hrs]	Prev. Repl. [%]	Failure Repl. [%]	Expected Time Between Replacements
Optimal Policy	0.378258	0.356373 (94.2 %)	0.0218851 (5.8 %)	98.8	1.2	3326.4
Replacement Only At Failure	1.52209	0 (0.0 %)	1.52209 (100.0 %)	0.0	100.0	3941.95
Saving	1.14383 (75.1 %)	-0.356373	1.5002	-98.8	98.8	-615.548

Tabla 3. Resumen de la información gráfica de la función costo. Fuente: EXAKT software.

La figura 9 ilustra la minimización del costo promedio global en función del contraste entre la información del costo promedio de un evento de falla funcional y el costo promedio de un reemplazo preventivo. El área roja representa los costos promedios atribuidos a eventos no planeados (fallas); y el área verde, a los costos promedios atribuidos a intervenciones TBM. El riesgo óptimo al costo promedio general ideal y el que se pretende: 0.69; 0.38 \$/hora.

La tabla 3 compara los costos y los tiempos promedios entre intervenciones por mantenimiento. Detalla que el costo mínimo de mantenimiento por la política propuesta del modelo resultante es de 0.38 \$/hora (94.2 % TBM y 5.8 % correctivo), tras fijar nuestras intervenciones por mantenimiento a largo plazo a 98.8 % por TBM bajo un MTBR de 3326.40 horas por sobre 1.2 % de intervenciones correctivas. De continuar sin la política propuesta, el costo por hora de mantenimiento resulta ser 75.1 % mayor que el óptimo, bajo un 100 % de intervenciones correctivas con un MTBF aproximado de 3 941.95 horas.

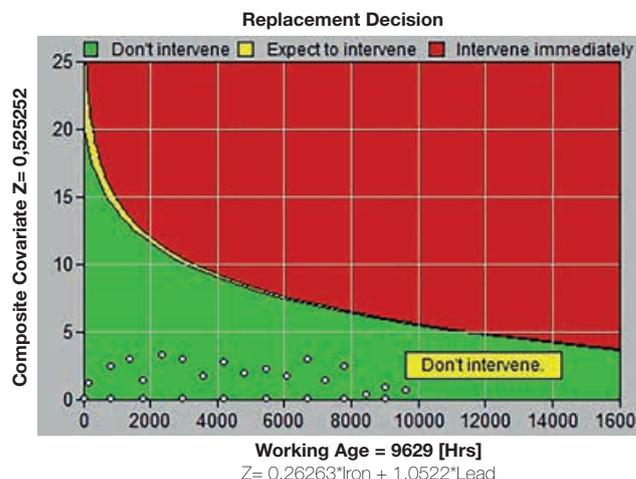


Figura 10. Suma ponderada de variables EHM vs. edad. Fuente: EXAKT software.

17-66: Condition-Based Replacement Policy – Decision Report
Trans (il) (350 T Transmission Oil Analysis)

Decision Parameters	
Recommendation	Don't intervene
Expect to Replace in [Hrs]	2 311.39
Probability of Failure in (250) [Hrs]	0.000210552
Probability of Failure in (500) [Hrs]	0.000443523
Report Date	06/07/18
Current Status	In operation

Tabla 4. Interpretación resumida de la figura 10. Fuente: EXAKT software.

Las decisiones tomadas a partir de la figura 10 recaen sobre la suma ponderada. De resultar el análisis sobre el área verde, implica que no se requiere intervención TBM por el momento; sobre el área amarilla, el activo no requiere TBM antes de la siguiente intervención CBM; y si se da sobre el área roja, se traduce en una intervención TBM inmediata. Prever reemplazo preventivo en 2 311.39 horas.

El criterio que se tome depende del alcance de las responsabilidades de sus gestores. Sin embargo, ambos son válidos.

RESULTADOS

Dada que esta iniciativa tiene sus bases en el personal más que en la tecnología, su soporte recae, permanentemente, sobre los indicadores de bajo nivel.

La metodología propició una mejora sistemática de la base del conocimiento RCM a través de sus continuas actualizaciones basadas en los registros reales de las órdenes de trabajo para respaldar al análisis de confiabilidad, lo que favorece la optimización del planeamiento de futuras órdenes de trabajo de mantenimiento en cuanto a estrategias y frecuencias de intervención.

Se mejoró la confianza del modelamiento predictivo al reducir la desviación estándar en el RULE gracias a la completa y correcta definición de los datos de edad. El mismo efecto trajo consigo la adecuada identificación de las variables EHM que, añadidas a la edad, redujeron el parámetro de forma dispuesto por el proceso Cox PHM, traducido en la subsecuente mejora de la efectividad de los programas CBM sobre la probabilidad de falla.

El proceso, básicamente, mejoró la forma de pensar del análisis de confiabilidad bidimensional tras hacerlo multidimensional. Una representación gráfica de esta mejora se ilustra como sigue:

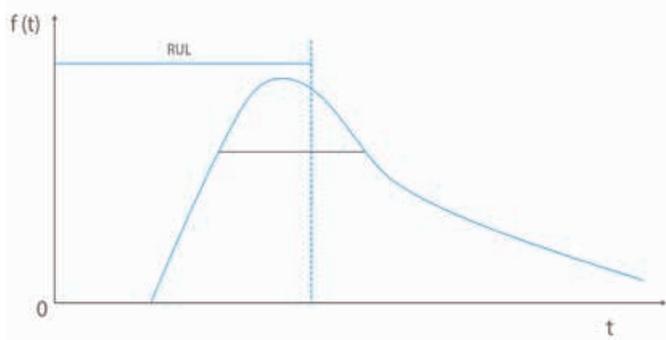


Figura 11. Función de densidad de probabilidad de falla. RUL y desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.

La figura 11 representa el modelamiento bidimensional entre los datos de edad capturados en sistemas CMMS/EAM respecto a la de desgaste bajo la condición actual del activo. Representando, además, sobre ella la vida útil remanente y el grado de dispersión.

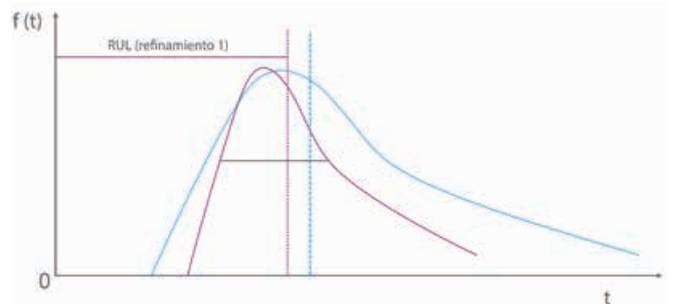


Figura 12. Primer refinamiento de la función de densidad de probabilidad de falla. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12, ocurre un primer refinamiento de la función de probabilidad de falla al mejorar la calidad de los datos de edad a través de la iniciativa propuesta (vinculación CMMS/EAM y RCM). El efecto de su correcta y completa definición provee una reducción significativa del margen de error en la estimación del RUL.

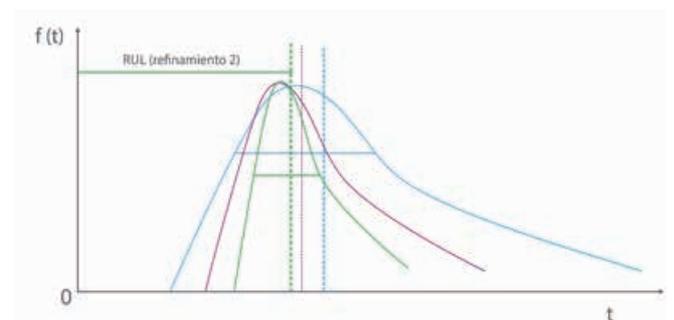


Figura 13. Segundo refinamiento de la función de densidad de probabilidad de falla. Fuente: Elaboración propia.

Surge un segundo refinamiento de la función de probabilidad de falla al incluir en el modelo una dimensión relevante correspondiente a las variables EHM significativas sobre la probabilidad de falla. Su resultado trae un efecto adicional de reducción del margen de error en la estimación del RUL (proceso Cox PHM).

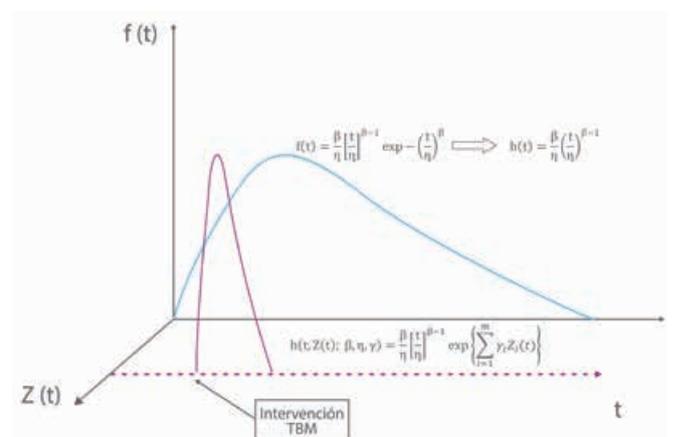


Figura 14. Análisis bidimensional de confiabilidad vs Análisis multidimensional (Cox PHM). Fuente: Elaboración propia.

El análisis de confiabilidad multidimensional de esta iniciativa da realmente sentido al CBM, lo que permite establecer una óptima estrategia TBM, justo antes de su rápido decrecimiento en confiabilidad en términos del RUL. Este análisis respalda la mejora sistemática de la gestión del mantenimiento a través de la toma de decisiones buenas y oportunas sobre las políticas de intervención.

CONCLUSIONES

- La estructura de los sistemas de información CMMS/EAM se centran en la planificación y la programación de los eventos de falla, la base de conocimiento RCM en la descripción precisa de eventos de falla probables y el entendimiento de sus comportamientos y sus consecuencias, mientras que el análisis de confiabilidad en modelamientos probabilísticos de futuros eventos de falla, llámese Cox PHM. La unificación e interacción de estos tres sistemas de conocimiento resulta en métricas de desempeño de alto nivel, las cuales se traducen en una mayor confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos y en un mejor ROI para la organización.
- El empleo de variables EHM, conjuntamente con los de edad, fortalece el criterio de los gestores de la ingeniería del mantenimiento en orden para tomar decisiones acerca de cómo, cuándo y qué mantener. Combinando los modelos Cox PHM y Markov, podemos proyectar la confiabilidad futura basada en actuales tiempos de operación y estados actuales de las variables EHM.
- La ventaja de una política CBM sobre una TBM como estrategia de mantenimiento es que considera tanto a la edad del activo como el estado su condición, encriptado en variables EHM (hasta el momento de la toma de decisiones), cuya relación observada conducirá a predicciones precisas sobre futuros eventos de falla. Así, se maximizará la vida útil del activo y la rentabilidad del negocio.

REFERENCIAS

- [1] Abernethy, R. (2004). *The New Weibull Handbook*. Florida: Dr. Robert B. Abernethy.
- [2] Barringer, H. (noviembre, 1995). Where Is My Data for Making Reliability Improvements? *Fourth International Conference on Process Plant Reliability*, Texas, 14-17.
- [3] Birolini, A. (1999). *Reliability Engineering*. Berlin: Springer y Verlag.
- [4] Campbell, J., Jardine, A., y McGlynn, J. (2011). *Asset Management Excellence*. Nueva York: CRC Press.

- [5] Duffuaa, S. Raouf, A., y Campbell, J. (2000). *Sistemas de mantenimiento, planeación y control*. México D.F.: Limusa Wiley.
- [6] Jardine, A., Campbell, J., y Wiseman, M. (2001). *Maintenance Excellence, Optimizing Equipment Life Cycle Decisions*. Nueva York: Marcel Dekker.
- [7] Jardine, A., y Tsang, A. (2013). *Maintenance, Replacement and Reliability: Theory and Applications*. Nueva York: CRC Press.
- [8] Kalbfleisch, J., y Prentice, R. (2002). *The statistical analysis of failure time data*. New York: Wiley.
- [9] Mora, A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- [10] Moubray, J. (1997). *Reliability Centred Maintenance, RCM*. Carolina del Norte: Edwards Brothers.
- [11] Lugtigheid, D., Banjevic, D., Jardine, A. (enero, 2005). Component repairs: when to perform and what to do. *Annual Reliability and Maintenance Symposium*, Virginia, 398-403.
- [12] RIAC, Reliability Information Analysis Center (2010). *Reliability Modeling*. New York: RIAC.
- [13] Wiseman, M., y Lin, D. (2014). *Reliability-Centered Knowledge*. Nueva York: CRC Press.
- [14] Yang, G. (2007). *Life Cycle Reliability Engineering*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

ACERCA DEL AUTOR

David Alonso Nájar Valdivia

Ingeniero mecánico electricista. Con estudios de posgrado en ingeniería de mantenimiento y confiabilidad aplicada a la gestión de activos físicos en Perú, Colombia y Canadá, trasladando estos conocimientos a la industria minera, principalmente, como gestor de mantenimiento y confiabilidad operacional de equipos de planta en Perú y Colombia. Además de estos estudios de posgrado, también cursó, en España, estudios sobre ingeniería de *pipng*, con experiencia en diversos proyectos *pipng* en plantas termosolares, centrales térmicas, plantas de cogeneración, plantas de tratamiento de aguas, plantas petroquímicas, sistemas de distribución, entre otros, en España, Marruecos, Argelia y Portugal. Cuenta también con estudios de posgrado en *Business Administration* en la Universidad ESAN de Perú.

@dnajar@jarvax.com.pe

Se creó un sistema de telemedicina para atender las necesidades específicas de pacientes en cuidado paliativo,

este recolecta datos del enfermo a través de un sensor, cuyas mediciones son examinadas por profesionales de la salud desde un dispositivo móvil o una computadora.



Telemedicina en cuidados paliativos: una aplicación que ayuda a cuidadores y personal médico

Telemedicine in Palliative Care: An Application which helps Caregivers and Medical Staff

RESUMEN

Este artículo propone una solución a un problema de salud pública asociado con pacientes en cuidado paliativo, que son atendidos por cuidadores en sus casas. Nuestro objetivo fue desarrollar una aplicación de telemedicina con buena aceptabilidad de los usuarios.

La metodología utilizada se dividió en 4 fases: 1) un estudio cualitativo para identificar qué necesidades existen en un entorno de cuidados paliativos en el domicilio; 2) desarrollo de aplicación y *hardware*; 3) validación y ajustes de las aplicaciones; y 4) implementación y evaluación de la aplicación. Como resultados, en la primera fase se definió el sensor médico esencial para cuidados paliativos, así como los temas de capacitación para el cuidador. En la segunda, se creó una aplicación que permite la monitorización remota del paciente. En la fase de validación y ajustes de la aplicación, se corrigieron algunos aspectos del *software* y *hardware*. En la última fase, la aplicación se implementó para un grupo de casos en la ciudad de Piura por un periodo de 30 días.

Como conclusiones, se identificaron las funcionalidades recomendadas para una aplicación de este tipo, tales como registro de la escala de dolor, registro de síntomas, seguimiento del tratamiento e informe de evolución de escaras. Existen muy pocos estudios de telemedicina en cuidados paliativos en general. Este desarrollo apoya a la comunidad científica al mostrar una implementación de un aplicativo de telemedicina en un país en vías de desarrollo, donde hay escasez de personal de salud capacitado en esta especialidad y los presupuestos de salud pública son limitados.

ABSTRACT

This article proposes a solution to the public health problem associated with patients in palliative care, who are cared for by caregivers in their homes. Our objective was to develop an accessible and acceptable telemedicine application for users.

The methodology used was divided into 4 phases: 1) Identification of the patients' requirements for caregivers in palliative care, 2) application and hardware development, 3) application validation and adjustments, and 4) application implementation and evaluation. As a result, in the first phase, it was defined the essential sensor for palliative care and training topics for the caregiver, as well. In the second phase, an application was created allowing remote monitoring of the patient. In the third phase of application validation and adjustments, there were some software and hardware aspects. In the fourth phase, the application was implemented in the city of Piura for a period of 30 days.

As conclusions, the functionalities recommended for an application of this type were identified as the record of pain scale, record of symptoms, record of functionalities, follow-up of treatment and report of the evolution of bedsores. There are very few telemedicine studies for palliative care. This development collaborates with the scientific community showing an implementation for a developing country, where there is little health personnel trained in this specialty and public health budgets are limited as well.



Palabras clave

Manejo del dolor, cuidado a distancia, telemedicina, cuidado paliativo.

Key words

Pain management, distance care, telemedicine, palliative care.

INTRODUCCIÓN

En países en vías de desarrollo, existe un número creciente de personas que padecen algún tipo de enfermedad terminal. Estas requieren cuidados paliativos, definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como «un planteamiento que mejora la calidad de vida de los pacientes (adultos y niños) y sus allegados cuando afrontan problemas inherentes a una enfermedad potencialmente mortal. Previenen y alivian el sufrimiento a través de la identificación temprana, la evaluación y el tratamiento correctos del dolor y otros problemas, sean estos de orden físico, psicosocial o espiritual» [19]. El cuidado paliativo está reconocido dentro del contexto del derecho humano a la salud. [2], [3].

Los hospitales y centros de salud no tienen la capacidad para atender a estos pacientes. Por ejemplo, según el Ministerio de Salud en Perú, en 2012 hubo 1.5 camas de hospital por cada 1 000 habitantes. En comparación, el Banco Mundial informó en 2014 que otras economías desarrolladas tienen más de diez camas por cada 1 000 habitantes. Estos pacientes pueden ser cuidados en casa, acompañados por sus familias, lo que aumenta su calidad de vida. El monitoreo de los signos vitales del paciente puede realizarse remotamente, permitiendo la interacción personal del médico con su paciente y familiares cuidadores a través de dispositivos tecnológicos [17].

El objetivo de este estudio es determinar si una aplicación de telemedicina puede tener una buena aceptación de los usuarios en el Perú. «Telemedicina se define como el uso de tecnología de telecomunicaciones para el acceso del paciente a servicios de salud» [1].

FUNDAMENTOS

El interés por la telemedicina se inició en los años setenta. Desde entonces, los estudios se enfocaron en áreas tales como oncología [5], cardiología [16], hipertensión [10], depresión [4], por mencionar algunas.

Sin embargo, hay muy pocos trabajos acerca de la aplicación de la telemedicina en cuidados paliativos. Entre ellos, el artículo de Peachey [12] describe un estudio piloto de telemedicina paliativa enfocada en la transmisión de datos vía teleconferencia durante las visitas periódicas de los médicos a los pacientes en cuidado paliativo en sus casas.

Existe otro estudio acerca de la aceptación que podría tener el uso de telemedicina en pacientes que han completado radioterapia paliativa [6]. El proyecto ECHO [8], por su parte, propone un modelo que no es exactamente telemedicina, pues busca diseminar el conocimiento de médicos especialistas en cuidado paliativo a médicos generales en áreas rurales.

Asimismo, investigaciones como la de Peng [13], evalúan la factibilidad, la reducción de costos y la satisfacción de los pacientes con dolor crónico. Lewis [7] y Salles [15] estudian la telemedicina y el cuidado de escaras de la piel, mientras que otros autores se enfocan en especialidades como Cardiología, Pediatría [9], Dermatología [18] y Urología [17].

Además, se utilizó una historia clínica simplificada en formato electrónico, la cual incluye el registro de datos de monitoreo de señales vitales del paciente, consultas, diagnósticos, tratamientos, escala del dolor, seguimiento a la toma de medicamentos y la posibilidad de comunicación virtual entre el cuidador del paciente y el médico tratante.

Esta investigación, que puede ser empleada como base de otras iniciativas, describe las fases de la metodología empleada, los hallazgos del estudio cualitativo, la aplicación desarrollada y la programación del *hardware*, de modo que allane el camino a otros investigadores para que progresen de forma más rápida en el desarrollo de aplicaciones de monitoreo de pacientes en cuidado paliativo.

METODOLOGÍA

En este trabajo, se creó un sistema de telemedicina para atender las necesidades específicas de pacientes en cuidado paliativo. Este sistema recolecta datos del enfermo a través de un sensor, cuyas mediciones son examinadas por profesionales de la salud desde un dispositivo móvil o una computadora conectados a Internet.

El estudio estuvo dividido en cuatro fases que se describen a continuación:

Fase 1: estudio cualitativo

En esta etapa, se realizaron dos grupos focales: uno, con la participación de ocho familiares encargados de un paciente en cuidado paliativo/crónico (enfermedad crónica incapacitante o cáncer terminal); y otro dirigido a ocho cuidadores de pacientes en cuidado paliativo (no familiares). Asimismo, se llevaron a cabo entrevistas en profundidad a seis médicos especialistas en cuidado paliativo, cuatro médicos generales, un psicólogo y tres enfermeras (Tabla 1).

Para analizar los resultados, la información obtenida se clasificó en tres grandes temas:

Gestión de la información de enfermedades crónicas, oncológicas y pacientes terminales. En esta categoría, se evaluó el grado de conocimiento que tenían los cuidadores en dichos temas.

Conocimiento y acciones en cuidado paliativo. Se exploró qué información y prácticas eran aplicadas por los cuidadores en el manejo de los pacientes, para luego contrastarlas con las acciones recomendadas por los médicos.

Uso de información y tecnologías de comunicación para cuidado paliativo. Dentro de esta categoría, se analizó el uso de dispositivos móviles por parte de los cuidadores y especialistas. Especialmente, en el empleo que consideraban posible a dichos dispositivos para la protección de pacientes en cuidado paliativo, sobre todo, en su monitoreo, el intercambio de información entre cuidadores y especialistas, el recordatorio de acciones específicas y el uso de tutoriales a través de los dispositivos.

Grupo	Lugar de trabajo	Participantes	Fecha	Lugar de entrevista
Cuidadores no familiares	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	6 cuidadores (enfermeras)	10/03/2016	Universidad peruana Cayetano Heredia
Cuidadores familiares	Programa de salud regional	4 familiares	25/02/2016	Hogar de la familia
	Programa de salud regional	2 familiares	16/03/2016	Hogar de la familia
	Programa de salud regional	3 familiares	16/03/2016	Hogar de la familia
	Programa de salud regional	2 familiares	16/03/2016	Hogar de la familia
Especialistas	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Médico especialista en cuidado paliativo 1	19/01/2016	Instituto privado para el tratamiento de cáncer
	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Médico especialista en cuidado paliativo 2	20/01/2016	Hospital público
	Programa de salud regional	Médico especialista en cuidado paliativo 3	26/01/2016	Dirección Regional de Salud
	Programa de salud regional	Médico especialista en cuidado paliativo 4	29/01/2016	Dirección Regional de Salud
	Programa de salud regional	Médico especialista en cuidado paliativo 5	29/01/2016	Dirección Regional de Salud
	Programa de salud regional	Médico especialista en cuidado paliativo 6	03/02/2016	Dirección Regional de Salud
	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Psicólogo 1	21/01/2016	Hogar de la persona entrevistada
	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Enfermera 1	11/02/2016	Instituto privado para el tratamiento de cáncer
	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Enfermera 2	12/02/2016	Instituto privado para el tratamiento de cáncer
	Instituto privado para el tratamiento de cáncer	Enfermera 3	23/02/2016	Instituto privado para el tratamiento de cáncer

Tabla 1. Fuentes de información.
Fuente: Elaboración propia.

Fase 2: diseño y desarrollo del software de aplicación

En este punto, se diseñó un prototipo funcional del sistema para satisfacer las necesidades de los pacientes y cuidadores en un entorno de cuidado paliativo, que fueron identificadas en la fase previa. Se tomaron en cuenta las mejores prácticas de usabilidad del *software*, para ofrecer una interface amigable y una buena experiencia de usuario. Se diseñó una base de datos para almacenar la información generada por la aplicación.

Fase 3: validación de la aplicación

Antes de probarse en pacientes reales, la aplicación fue ensayada por el equipo del proyecto (validación interna) y luego con personal médico no involucrado en el estudio (validación externa).

Fase 4: implementación y evaluación de la aplicación

Después de la etapa de validación, se procedió a la implementación del sistema de telemedicina. La información acerca de pacientes elegibles para el proyecto fue obtenida directamente de instituciones y médicos en contacto con las familias. El personal médico ofreció a los pacientes y sus cuidadores la posibilidad de participar durante el estudio piloto. Además, se les solicitó que firmen un documento de consentimiento informado antes de ser reclutados.

Antes de la implementación, los cuidadores familiares y no familiares fueron entrenados en el uso de los dispositivos. Durante esta etapa, se realizaron los ajustes necesarios para asegurar que estos funcionaran apropiadamente. Los médicos también fueron capacitados en el uso de la historia clínica simplificada. Asimismo, se llevó a cabo un acompañamiento constante a los cuidadores y personal médico por parte del equipo técnico de soporte.

Se preparó un reporte de implementación, que tomaba en consideración encuestas de usabilidad a los cuidadores. Cada dos días se generó un análisis de datos enviados por el pulsoxímetro, esta información se almacenó en el servidor de base de datos de la nube. En los diez pacientes, la aplicación fue evaluada a través de encuestas de usabilidad y satisfacción.

RESULTADOS

La tecnología en estudio fue bien aceptada por los cuidadores familiares, quienes reconocieron un impacto favorable en el entorno del paciente.

En la fase 1, se concluyó lo siguiente: 1) el empleo de las tecnologías de la información y la comunicación en el área de cuidados crónicos y paliativos es importante, 2) es esencial la comunicación entre el personal de salud y los cuidadores, 3) se requiere el uso de escalas y protocolos para una adecuada

atención de los pacientes, 4) se identificó la necesidad de que los cuidadores sean entrenados en seis tópicos relacionados con el paciente en cuidado paliativo: prevención de escaras, aplicación de inyectables, higiene, cuidados generales del paciente, uso de bolsa de colostomía y alimentación, 5) se aprendió que el pulsoxímetro era un sensor imprescindible, en tanto que incluir más sensores podría afectar negativamente la calidad de vida del paciente sin proveer información relevante. Por ello, se descartó la idea de utilizar un kit de doce sensores a ser conectados al paciente, 6) es necesario tener un sistema con módulos correctamente integrados, que incluya escalas de dolor y protocolos y 7) es importante mantener un registro electrónico de la data del paciente.

Una implementación de un sistema de telemedicina para pacientes en cuidado paliativo en un programa de salud pública debe tener en cuenta la falta de conocimientos en cuidado paliativo de los cuidadores familiares y recursos materiales limitados.

Los cuidadores identificaron tópicos de capacitación que consideraron necesarios: higiene, alimentación, cuidados generales, uso de bolsa de colostomía, inyectables y prevención de escaras. Por esta razón, se crearon videos de instrucción para cada tema que se almacenaron localmente en el dispositivo móvil (*Tablet*) para que así no se consumiera el plan de datos al descargar continuamente el video de Internet.

En la fase 2 se desarrolló una aplicación con el uso de herramientas *Open Source*.

El *software* es una aplicación accesible vía web creada por medio de herramientas *Open Source* y con base de datos en la nube, que ofrece diferentes perfiles para el cuidador y el médico.

La aplicación comprende de los siguientes componentes:

Módulo de comunicación

Está compuesto por un *software* de transmisión de información desde el cuidador a los especialistas y viceversa. Además, envía datos capturados por el pulsoxímetro. El sistema muestra también información del paciente en un formato visualmente amigable, el cual incluye pestañas con gráficos e íconos.

Módulo de registro

El aplicativo tiene perfiles de usuario con identificador y contraseña que permiten el acceso a un conjunto de opciones de acuerdo al rol de médico o cuidador.

Módulo de entrenamiento

Contiene videos de instrucción para el cuidador.

Módulo de monitoreo (*hardware*)

El *hardware* incluye un oxímetro de pulso y una cámara de video. Para los cuidadores, se eligió una tablet de 8 pulgadas, a la cual se añadió un chip de telefonía móvil 3G con un plan de datos. Se recibían los datos desde el pulsoxímetro, los cuales se transmitían de forma inalámbrica a la *tablet* que, a su vez, los enviaba a la nube.



Figura 1. Kit para el cuidador.
Fuente: Elaboración propia.

El perfil del cuidador (Figura 2) tiene cinco opciones para enviar información al médico, con fecha y hora de transmisión: 1) Escala de dolor (de 0 a 10); 2) Síntomas (fiebre, dificultad para respirar, náuseas, diarrea, estreñimiento, dificultad para dormir, ansiedad/decaimiento); 3) Funcionalidad (capacidad para atender de forma autónoma sus necesidades fisiológicas); 4) Tratamiento (organizado como un calendario acompañado de una agenda en la cual los cuidadores pueden registrar la medicación administrada al paciente); 5) Escaras (puede adjuntar fotos para reportar la evolución de las escaras); y 6) Opción para visualizar videos de instrucción sobre higiene, alimentación, uso de bolsa de colostomía, inyectables y prevención de escaras.



Figura 2. Perfil del cuidador.
Fuente: Elaboración propia.

El perfil del médico (Figura 3) permite visualizar la lista completa de pacientes, seleccionar uno y revisar la evolución de datos tales como temperatura, pulso, dolor, medicación, antecedentes y síntomas específicos como por ejemplo fiebre o mareo.



Figura 3. Perfil del médico.
Fuente: Elaboración propia.

En la fase 3, la aplicación fue validada tanto por el personal involucrado en el proyecto (validación interna) como por médicos

no vinculado al estudio (validación externa). Las acciones de validación interna y los hallazgos se describen en la tabla 2.

Alcance de la validación	<ul style="list-style-type: none"> • Especificaciones de diseño. • Modelo Entidad-Relación (diagrama de estructura) de la base de datos. • Diccionario de datos del médico. • Diccionario de datos del paciente. • Manual del usuario (entendimiento). • Manual del sistema (correspondencia con aplicativo). • <i>Interface</i> del paciente. • <i>Interface</i> del doctor. • Verificación interna del sistema.
Validación interna (pasos)	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso a la página web de la aplicación desde una PC de escritorio y una <i>tablet</i> con comunicación WIFI local 3G. • Ingreso a cuenta del médico para incorporar datos de un nuevo paciente. • Llenar información correspondiente a 30 consultas de distintos pacientes. • Validación de los tipos de datos de cada campo. • Validación de cada una de las opciones del menú. • Acceso al perfil del cuidador. • Verificación de la correlación entre la información ingresada por el médico para un paciente <i>versus</i> la información visible al cuidador del mismo paciente.
Oportunidades de mejora	<ul style="list-style-type: none"> • Corregir longitud de campos para ingreso de datos (sexo, historia clínica, estado civil, documento de identidad). • Lograr una navegación entre formularios más fluida. • Ausencia de campos para ingresar posibles reacciones alérgicas a determinados medicamentos. • Incorporar cálculo automático del índice de masa corporal.

Tabla 2. Validación interna de la aplicación.
Fuente: Elaboración propia.

Después de incorporar las recomendaciones, se llevó a cabo la validación externa.

Tres médicos fueron invitados a probar la funcionalidad de la aplicación que denominamos *Telejampiq* y darnos retroalimentación para mejorar la aplicación.

Los profesionales invitados jugaron el rol de médicos visitantes que hacían una primera entrevista al paciente. No se entregó el manual de uso de la aplicación con la intención de evaluar qué tan intuitiva era la *interface* del *software* desarrollado. Los hallazgos se muestran en la tabla 3.

Evaluador 1

- Considerar que el médico puede registrar más de un diagnóstico y tratamiento.
- Arreglar el resultado del cálculo automático del índice de masa corporal (IMC) de acuerdo a fórmula.
- Incorporar la posibilidad de colocar cifras de precisión decimales para la temperatura y talla (según diccionario de datos).
- En la sección Examen Físico, se sugiere añadir una columna «conservado» y que todas las opciones que incluya ya aparezcan marcadas por defecto.
- Distribuir el tratamiento en formato de dosificación.

Evaluador 2

- Es recomendable incluir filtros por provincia, departamento, ubigeo y otros.
- Un error de aplicación se detectó al dejar en blanco el campo de historia clínica. La aplicación debe mostrar un mensaje de advertencia.
- Se sugiere que la aplicación ofrezca la posibilidad de añadir más de un antecedente del paciente en cualquier etapa de la entrevista.
- Se debería poder ingresar más de un medicamento.
- Es recomendable separar la cantidad de la dosis del nombre del medicamento.

Evaluador 3

- Se sugiere que se incremente el tamaño de las letras del menú de inicio.
- El rendimiento es bajo. Se pierde conexión a la red 3G.
- El formulario es muy largo. Esto limita la interacción con el paciente. Normalmente el médico requiere mayor tiempo de atención con un paciente de cuidado paliativo.
- Ofrecer la opción de añadir más de un antecedente.
- Se sugiere facilitar el ingreso de medicamentos.
- Los menús desplegables tardan mucho en aparecer.
- La historia clínica podría ir después del diagnóstico para seguir un orden lógico.
- Añadir un campo de enfermedades frecuentes.

Tabla 3. Validación externa de la aplicación.
Fuente: Elaboración propia.

En la fase 4, se implementó el prototipo funcional de la aplicación durante 30 días en la ciudad de Piura con 10 pacientes en cuidado paliativo, el 70 % de ellos con cáncer terminal. Dichos pacientes están en sus domicilios y son atendidos por personal de salud pública conformado por médicos, enfermeras, psicólogos y técnicas de enfermería.

Dos médicos del equipo del proyecto viajaron en turnos a la ciudad de Piura. Entrenaron a los cuidadores y estuvieron presentes en el domicilio de los pacientes para atender las consultas de dichos cuidadores acerca de la aplicación o recolección de datos del pulsoxímetro.

En esta etapa, se detectaron problemas en el sistema, originados por el escaso dominio de los cuidadores en el manejo de este dispositivo. Sin embargo, hubo el acuerdo de los cuidadores de usar el equipo y el sistema para monitorear a sus pacientes. Asimismo, se convino con el personal de salud que visitara a los enfermos semanalmente. El compromiso del personal de salud y cuidadores contribuyó a la mejora de la calidad de vida del paciente. El sistema permitió que ambos pudieran interactuar con mayor fluidez, además de brindar un soporte educativo a través de los videotutoriales de cuidado paliativo.

Los testimonios de los cuidadores reflejan la aceptación que tuvo el sistema de telemedicina:

«Me gusta utilizar este sistema porque siento que los doctores están en mayor contacto con nosotros, no solo durante las visitas presenciales».

«Voy a ir aprendiendo poco a poco a usar el sistema, es bueno usar dispositivos tecnológicos para el beneficio de la salud».

«Los videos educativos se ven muy interesantes, he aprendido acerca del cuidado que debo tener con mi familiar».

La figura 4 muestra el dispositivo implementado en uno de los casos.

CONCLUSIONES

- En este artículo hemos descrito un proyecto de dos años realizado por un equipo de médicos e ingenieros pertenecientes a dos universidades. El piloto de implementación del proyecto en la ciudad de Piura ofreció solución de telemedicina para los pacientes en cuidado paliativo, sus cuidadores o técnicas de enfermería y médicos.
- Asimismo, es importante seleccionar la tecnología adecuada. Los pacientes en cuidado paliativo tienen necesidades de monitoreo que no deberían afectar negativamente su calidad de vida. Un sensor recomendable es el pulsoxímetro. En una implementación de un sistema de cuidado paliativo, debemos escoger cuidadosamente la tecnología a utilizar en los sensores médicos y en las tablets, porque no debería ser tan sofisticada para que pueda ser utilizada en la práctica diaria por el médico general o especialista. Elegimos una tecnología accesible de telefonía móvil 3G, pulsoxímetro, tablets y conexión a Internet, en vez de tecnología de videoconferencia compatible con HIPAA. Por razones de facilidad de uso y precio, se usó una tablet de 8 pulgadas para facilitar la manipulación al cuidador, y para que el plan de datos se use eficientemente, se evitó la instalación de aplicaciones que reduzcan el rendimiento. Durante el piloto, nos dimos cuenta de que la batería de la tablet solo duraba de 6 a 8 horas de modo que era necesario recargarla.
- Es importante diseñar interfaces amigables con el usuario que permitan utilizar con facilidad la tecnología. Las características deseables identificadas para una aplicación de ese tipo fueron: registro de escala del dolor, registro de síntomas, registro de funcionalidad del paciente, seguimiento de tratamiento, reporte de la evolución de escaras.



Figura 4. Dispositivo implementado en casa de uno de los pacientes.
Fuente: Elaboración propia.

- Otro hallazgo fue que los cuidadores preferían videos de instrucción protagonizados por personajes animados y no por seres humanos.
- Nuestro trabajo aporta a la comunidad científica al mostrar una implementación de un sistema de telemedicina en un país en vías de desarrollo, donde hay poco personal con experiencia en la especialidad de cuidados paliativos y los presupuestos de salud pública son limitados.
- La falta de entrenamiento y concientización es uno de los mayores obstáculos a programas que buscan mejorar el acceso a la salud de los pacientes en cuidado paliativo y, a nivel latinoamericano, existen pocos grupos de médicos dedicados a esta especialidad.

REFERENCIAS

- [1]** Agnisarman, S. O., Chalil Madathil, K., Smith, K., Ashok, A., Welch, B. & McElligott, J. T. (2017). Lessons learned from the usability assessment of home-based telemedicine systems. *Applied Ergonomics*, 58, 424-434
- [2]** Brennan, f. (2007). Palliative care as an international human right. *J. Pain SymptomManage*, 33(5), 494–499.
- [3]** Gwyther, L., Brennan, F. & Harding, R. (2009). Advancing palliative care as a human right. *J. Pain Symptom Manage*, 38, 767–774.
- [4]** Jones, B. N. (1999). Acceptance and Accuracy of Telemedicine in Geriatric Depression. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 7, 18–19.
- [5]** Kronberger, L. (2006). 189 Poster Telemedicine in oncology. *European Journal of Surgical Oncology (EJSO)*, 32, S56.
- [6]** Lau, M., Wong, R., Bezjak, A. & Levin, W. (2014). Factors that Influence the Acceptability of Telemedicine as a means to Evaluate Treatment Outcome for Patients Completing Palliative Radiotherapy. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, Jun;45 (2), 169 .
- [7]** Lewis, M., Choi, H., Boushell, M., Barsanti, P., Alquist, M. & Sabharwal, S. (2003). Poster 189. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84 (9), E37.
- [8]** Marr, L. & Neale, D. (2012). Project ECHO: Bringing Palliative Care Consultation To Rural New Mexico Through a Novel Telemedicine Format (748). *Journal of Pain and Symptom Management*, 43 (2), 448–449.
- [9]** North American experience in pediatric cardiology telemedicine: Summary from telemedicine users group. (1996). *Journal of the American Society of Echocardiography*, 9 (3), 402.
- [10]** Omboni, S. & Ferrari, R. (2015). The role of telemedicine in hypertension management: focus on blood pressure telemonitoring. *Current Hypertension Reports*. 17, 21
- [11]** Pastrana, T., De Lima, L., Wenk, R., Eisenclas, J., Monti, C., Rocafort, J. & Centeno, C. (2012). *Atlas de Cuidados Paliativos de Latinoamérica ALCP*. Houston: IAHPIC Press.
- [12]** Peachey, M., Triplett, J. & Karlekar, M. (2017). Reaching Out to Those Who Can't Reach Us: A Pilot Project Incorporating Palliative Telemedicine in Home Health Practice (TH368). *Journal of Pain and Symptom Management*, 53(2), 344
- [13]** Peng, P., Stafford, M., Salenieks, M. & Wong, D. (2004). Pain services: cancer: Telemedicine in chronic pain management—a pilot project. *The Journal of Pain*, 5 (3), S140
- [14]** Reis, A., Pedrosa, A., Dourado, M. & Reis, C. (2013). Information and Communication Technologies in Long-term and Palliative Care. *Procedia Technology*, 9
- [15]** Salles, N., Baudon, M. P., Caubet, C., Barateau, M., Baudinet, M., Valentin, V. & Rainfray, M. (2014). Telemedicine consultation in nursing home for patients with pressure ulcers. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 57(1), 213
- [16]** Triantafyllidis, A., Velardo, C., Chantler, T., Shah, S. A., Paton, C., Khorshidi, R., ... Noble, J. (2015). A personalised mobile-based home monitoring system for heart failure: The SUPPORT-HF Study. *International Journal of Medical Informatics*. 84(10), 743-753
- [17]** Van den Berg, N., Schumann, M., Kraft, K. & Hoffmann, W. (2012). Telemedicine and telecare for older patients—A systematic review. *Maturitas*, 73 (2), 94–114.
- [18]** Wootton, R. (1997). WS125 Telemedicine — An overview. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 9, S105.
- [19]** World Health Organization (2017), Recuperado <http://www.who.int/cancer/palliative/definition/en/>

ACERCA DE LOS AUTORES

Juan Carlos Bueno Villanueva

Docente asociado e investigador de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Ingeniero de sistemas por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y Magíster en Dirección y Tecnologías de Información por la Universidad ESAN.

Contribuyó al proyecto como coordinador por el equipo de UTEC y como miembro del equipo de investigadores. Participó en la concepción del sistema de telemedicina.

@jbueno@utec.edu.pe

Jaime Moshe Farfán Madariaga

Docente e investigador. Maestría en Dirección Estratégica en Tecnologías de Información por la Universidad de Piura, e ingeniero de sistemas por la Universidad Católica Santa María, Arequipa. Especialista en áreas de programación y base de datos. Desde el 2004 es docente y ha sido coordinador de la carrera de Diseño de *Software* e Integración de Sistemas en Tecsup Sede Centro.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de investigadores. Supervisó el desarrollo del *software*.

@jfarfan@tecsup.edu.pe

José Gaspar de la Puente Maldonado

Docente a tiempo completo en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Ingeniero mecánico por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Maestría de Economía de la Universidad del Pacífico. Participante del Programa Doctoral en Dirección de Organizaciones del PAD. Escuela de Dirección de la Universidad de Piura.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de investigadores.

@jdelapuerta@utec.edu.pe

Julio Ernesto Valdivia Silva

Director de la carrera de Bioingeniería de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Médico cirujano graduado en la Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú. Fundador del Grupo de Investigación en Inmunología, la Academia Peruana de Medicina Molecular y la Sociedad Científica de Astrobiología del Perú, la cual preside. Tiene doctorados en el Instituto de Ciencias Nucleares Universidad Nacional de México (UNAM) por el Programa de Astrobiología de la NASA (*Ames Research Center*) para estudios microbiológicos en análogos a Marte, y en el Instituto de Investigaciones Biomédicas (UNAM), donde realiza estudios en biología molecular e inmunología del cáncer.

Contribuyó al proyecto como asesor de la parte metodológica durante el desarrollo de la investigación.

@jvaldivias@utec.edu.pe

Anthony Aróstegui

Estudiante del último ciclo de Ingeniería Industrial de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Participante en varios proyectos de desarrollo de *software*.

Contribuyó al proyecto con el desarrollo del *software*.

@anthony.arostegui@utec.edu.pe

Bregy Malpartida

Estudiante de la carrera de Electrónica en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).

Participante en varios proyectos de innovación tecnológica. Contribuyó al proyecto en la implementación del *hardware* del sistema de telemedicina.

@bregy.malpartida@utec.edu.pe

Luis Enrique Peña Mendoza

Ingeniero industrial por la Universidad de Ingeniería UNI, Maestría en Dirección de Empresas por la Universidad de Piura. Trabaja en la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo.

@luis.penha@upch.pe

César Arce Zárate

Docente en Tecsup Sede Centro, ingeniero de Sistemas por la UPC. Participación en proyectos tecnológicos.

Contribuyó al proyecto en la supervisión del diseño del *hardware* del sistema de telemedicina.

@carce@tecsup.edu.pe

Jose Enrique Pérez-Lu

Médico, magíster en Investigación Epidemiológica, doctor en Salud Pública. Investigador con afiliación a la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Actualmente, se desempeña como director general de la Oficina de General de Tecnologías de la Información del Ministerio de Salud de Perú.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de investigadores. Participó en la concepción del sistema de telemedicina desde el punto de vista médico. Fue coordinador general del proyecto.

@jose.perez.l@upch.pe

Miguel Egoavil

Médico, egresado de la maestría en Informática Biomédica en Salud Global de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Coordinador de la Unidad de Informática Biomédica en Salud Global - Facultad de Salud Pública y Administración, investigador y coordinador de proyectos de investigación en Informática Biomédica.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de investigadores. Participó en la concepción del sistema de telemedicina desde el punto de vista médico.

 miguel.egoavil@upch.pe

Daniel Flavio Condor

Enfermero, egresado de la maestría en Informática Biomédica en Salud Global de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Investigador de la Unidad de Informática Biomédica en Salud Global - Facultad de Salud Pública y Administración. Coordinador de proyectos de investigación en Informática Biomédica. Coordinador de Comunicación de la Red Internacional de Enfermería Informática.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de investigadores. Participó en la concepción del sistema de telemedicina desde el punto de vista del profesional de la salud.

 daniel.condor.c@upch.pe

Miguel Alonso Pinazo-Vidal

Médico, estudiante de la maestría en Informática Biomédica en Salud Global de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de implementación y pruebas con pacientes. Participó en la validación del aplicativo.

 miguel.pinazo@upch.pe

Juan Manuel Quezada

Ingeniero electrónico, estudiante de la maestría en Informática Biomédica en Salud Global de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Contribuyó al proyecto como miembro del equipo de implementación y pruebas con pacientes. Participó en la concepción del sistema de telemedicina y la validación del aplicativo.

 juan.quezada.c@upch.pe

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Innovate Perú del Ministerio de la Producción, el cual brindó fondos al proyecto.

Se presenta el diseño un controlador neurodifuso que posibilita el uso de conocimiento de usuario experto con la adaptabilidad y capacidad de aprendizaje de las redes neuronales.



Control neurodifuso de un péndulo invertido rotacional

Neuro Fuzzy Control for an Inverted Rotational Pendulum

RESUMEN

En este artículo, se presenta el diseño de un controlador neurodifuso para el péndulo invertido rotacional, el cual integra las ventajas del conocimiento de un usuario experto, con las habilidades adaptativas de una red neuronal.

El sistema es diseñado para el control de los dos grados de libertad del péndulo, es decir, ángulo del péndulo y ángulo de la plataforma. Este péndulo invertido rotacional, al ser un sistema subactuado, está controlado únicamente por un motor DC a su vez conectado a un microcontrolador Arduino.

Para lograr el control, fue implementado un sistema neurodifuso, compuesto por dos módulos que usan las cuatro principales variables del sistema (los dos ángulos y sus variaciones), para luego ser éste entrenado usando aprendizaje por método híbrido. Para complementar el controlador, se unió este con un método de amoldamiento de energía para realizar el «swing-up» (balanceo vertical) del péndulo.

El controlador fue implementado y comparado con un regulador lineal cuadrático tradicional (LQR), demostrando tener un desempeño similar a este último. La ventaja principal radica en la fácil adaptación del controlador ante variaciones del sistema.

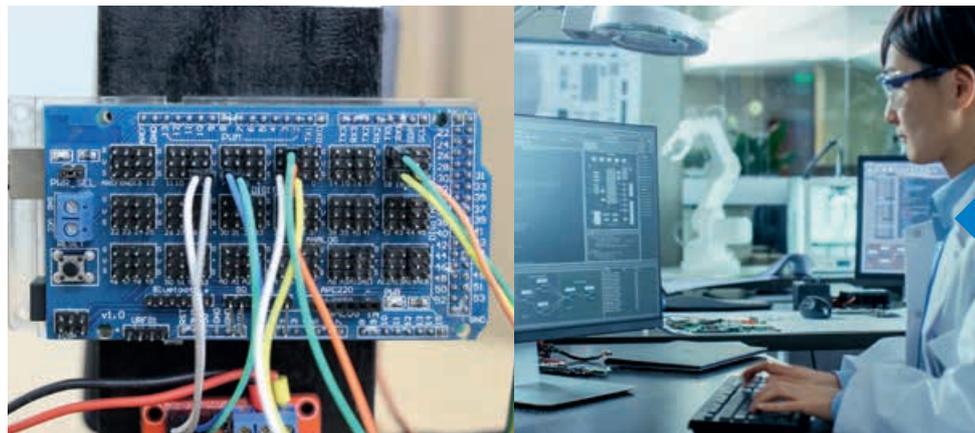
ABSTRACT

This article describes the design of a fuzzy controller for an inverted rotational pendulum, which adds the advantages of the knowledge of an experimented user and the adaptive capabilities of neural networks.

The system is designed for two degrees control of the rotational pendulum, i.e. angle of the pendulum and angle of the platform; this rotational inverted pendulum, being a sub-acting system, is controlled only by a DC motor which is in turn connected to an Arduino microcontroller.

To achieve the control, it was implemented a two-module neuro-fuzzy system using the 4 main variables of the system (two angles and their variations) and then trained using hybrid learning. To complement the controller, it was coupled with an energy shaping method to swing up the pendulum.

The controller was implemented and compared with a traditional linear quadratic regulator (LQR) controller showing similar performance. The main advantage of the new controller is its adaptation to system variations.



Palabras clave

Péndulo invertido rotacional, controlador neurodifuso, aprendizaje híbrido, LQR.

Key words

Rotational inverted pendulum, neuro-fuzzy controller, hybrid learning, LQR.

INTRODUCCIÓN

El péndulo invertido es un sistema demostrativo clásico para la implementación de técnicas de control avanzado y no-lineal que es apreciado en muchas aplicaciones de la vida real [2]. El sistema está compuesto por una base móvil que provee de energía cinética al péndulo y el péndulo en sí mismo. El péndulo Furuta o rotacional [3] es un sistema subactuado de dos grados de libertad donde la actuación es manejada por un brazo o plataforma que rota en la dirección horizontal en una manera análoga al clásico sistema carro-barra (*cart-pole*), aunque con una arquitectura más compacta.

El sistema presenta un desafío para la ejecución de un seguimiento debido a su naturaleza subactuada y a su dinámica compleja, es decir, presenta una dinámica mucho más compleja que la de un sistema *cart-pole* [2]. Sin embargo, este es un sistema compacto que hereda sus principales características del *cart-pole*. El interés de tales sistemas puede ser principalmente apreciado en la robótica para el control del movimiento en brazos y piernas [9].

En este artículo, se presenta el diseño del controlador neurodifuso que posibilita el uso de conocimiento de usuario experto con la adaptabilidad y capacidad de aprendizaje de las redes neuronales [5]. En comparación con otras técnicas de control utilizadas frecuentemente en este mecanismo, tales como los controladores PID [7] o el controlador por regímenes deslizantes [4], que pueden ser complicados de sintonizar para la estabilización de ambos ejes, el controlador neurodifuso es capaz de efectuar la tarea de estabilización incluso sin entrenamiento previo y para diferentes mecanismos, pues no requiere de un modelo del sistema para su implementación. Contrariamente a un controlador neuronal [6], este puede basarse además en la inferencia lógica. Por otra parte, la implementación de estructuras neurodifusas tradicionales, como el ANFIS [1], pueden resultar muy complejas.

Hemos integrado nuestro controlador con un algoritmo de amoldamiento de energía [9], y luego realizado un análisis comparativo con un regulador lineal cuadrático óptimo [8]. El objetivo de este procedimiento fue el de ilustrar la implementación pedagógica de controladores neuronales adaptativos en el laboratorio de control avanzado del Instituto Superior Tecnológico Tecsup.

El artículo está dividido en las siguientes secciones: primero, explicaremos el modelado del sistema y establecemos el algoritmo de amoldamiento de energía a usar para el balanceo vertical del péndulo a la posición vertical; luego, describiremos la metodología usada para implementar el sistema neurodifuso y el proceso de entrenamiento, así como los detalles de su diseño; también, mostraremos el sistema simulado e implementado, finalmente se presentan las conclusiones obtenidas.

FUNDAMENTOS

La estructura mecánica del péndulo rotacional es representada en la figura 1, el torque (τ) es aplicado al brazo horizontal. Este se moverá positivamente en la dirección horaria, generando un ángulo β con respecto al origen. El segundo brazo es el péndulo,

el cual rota libremente en la dirección vertical, el ángulo de este brazo con la vertical es denominado θ .

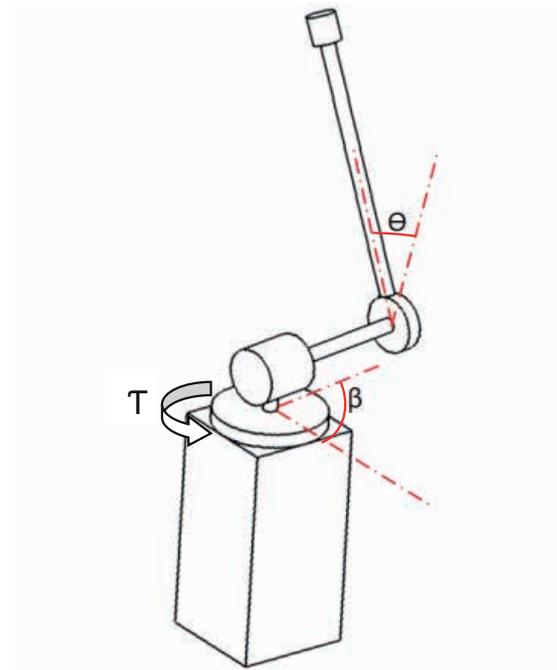


Figura 1. Estructura mecánica del péndulo Furuta.

Fuente: Elaboración propia.

Las variables de estado del sistema elegidos son el ángulo de la base (β) y el péndulo (θ) denominando así:

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ \theta \end{bmatrix}$$

La dinámica del sistema en forma de Euler-Lagrange es la siguiente:

$$D(x)\ddot{x} + H(\dot{x}, x) + G(x) = B(x)u \quad (1)$$

Donde las matrices son dadas como:

$$D = \begin{bmatrix} I_o + m_1(L_o^2 + l_1^2 \sin^2 \theta) & m_1 l_1 L_o \cos \theta \\ m_1 l_1 L_o \cos \theta & J_1 + m_1 l_1^2 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 \sin 2\theta \dot{\theta} \dot{\beta} - m_1 l_1 L_o \sin \theta \dot{\theta}^2 \\ -0.5 m_1 l_1^2 \sin 2\theta \dot{\beta}^2 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 g l_1 \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para realizar el balanceo vertical del péndulo, el sistema usa el algoritmo de amoldamiento de energía que ha sido propuesto en [9]. La energía total del sistema es:

$$E = E_k + E_p$$

Donde E_k la energía cinética y E_p la energía potencial. La primera es generada por la base y transmitida al péndulo, y se describe en la ecuación (2), mientras que la energía potencial es identificada únicamente por el ángulo del péndulo en (3).

$$E_k = 0.5 \dot{x}^T D \dot{x} \quad (2)$$

$$E_p = m_1 g l_1 \cos \theta \quad (3)$$

La energía deseada del sistema en la posición debe ser energía potencial pura. Para ello, se define la diferencial de energía como:

$$\dot{E} = 0.5 \dot{x}^T D \dot{x} + m_1 g l_1 (\cos\theta - 1) \quad (4)$$

El comando por amoldamiento de energía [3] se extrae de la evaluación de la función de Lyapunov en (5) propuesta en [9].

$$V(\dot{x}, x) = \frac{k_E}{2} \dot{E}^2 + \frac{k_\beta}{2} \dot{\beta} + \frac{k_\theta}{2} \beta \quad (5)$$

La solución para (4) con la función de Lyapunov presentada antes permite encontrar la ley de control en (6):

$$u = \frac{k_w B^T D^{-1} (H + G) - k_o * \beta - k_d * \dot{\beta}}{k_e E + k_w B^T D^{-1} B} \quad (6)$$

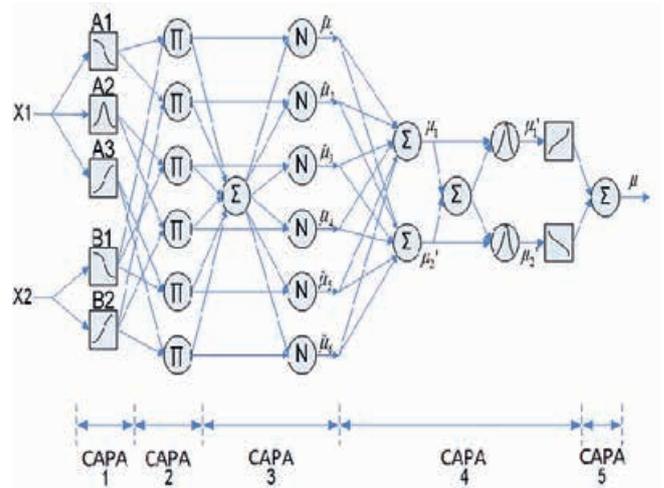


Figura 2. Estructura de ANFIS.
Fuente: Adaptado de [5].

METODOLOGÍA

Diseño del controlador neurodifuso

El controlador es compuesto por una serie de acciones coordinadas por un árbitro, las cuales son implementadas a través de redes neurodifusas basadas en la estructura ANFIS [5]. En esta sección, la estructura ANFIS es presentada en A; el diseño del sistema de control, en B; y el procedimiento de entrenamiento, en C.

A. Redes ANFIS

Un esquema de red neurodifusa es usado para implementar la lógica de los comandos. La estructura empleada es adaptada de [5] y es presentada en la figura 2. Se compone como sigue.

Capa 1: Neuronas implementando las funciones de pertenencia:

$$O_{1,i}^A = A_i(x_A); O_{1,i}^B = B_i(x_B) \quad (7)$$

Capa 2: Nodos producto, que calculan la componente para cada regla:

$$O_{2,i} = O_{1,n}^A \cdot O_{1,m}^B \quad (8)$$

Capa 3: Capa de normalización:

$$O_{3,i} = \frac{O_{2,i}}{\sum_{i=1}^N O_{2,i}} \quad (9)$$

Capa 4: Nodos adaptativos para generar la consecuencia de cada regla:

$$O_{4,i} = O_{3,i} \cdot f_n \quad (10)$$

Capa 5: Suma de señales de-difusificadas para obtener la salida de la red:

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^M O_{4,i} \quad (11)$$

B. Parte difusa del controlador

El controlador se diseñó para el control de la inclinación del péndulo y del brazo horizontal. Para el control de ambas dinámicas, necesitamos considerar todos los estados. Ello, infortunadamente, podría requerir muchas reglas debido a todas las posibles combinaciones entre las cuatro variables [1], haciendo así el diseño muy tedioso.

Para evitar ello, se realizó la separación del controlador en dos módulos. El primer módulo da la corrección para la dinámica de los ángulos (θ , β); mientras que el segundo módulo, para la dinámica de las velocidades ($\dot{\theta}$, $\dot{\beta}$). Cada uno es conformado por un sistema con tres funciones de pertenencia por entrada y nueve reglas de inferencia.

Comparado con el método clásico de considerar la forma PD en la inferencia difusa (e.g. θ y $\dot{\theta}$ como entradas), la estrategia usada permite acoplar mejor las acciones y por ello la fusión de ambos módulos puede realizarse con una simple adición (Figura 3). Se puede decir que el primer módulo genera la acción de corrección para el estado presente y el segundo módulo la acción para la predicción.

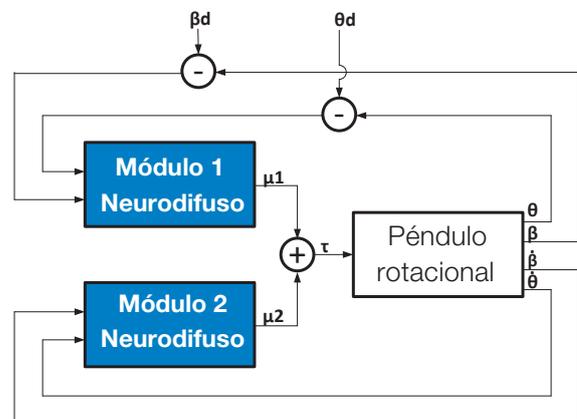


Figura 3. El diseño del controlador neurodifuso.
Fuente: Elaboración propia.

Se elaboraron las siguientes reglas de inferencia para el módulo 1:

- Si θ es NE y β es NE, entonces μ_1 es NE.
- Si θ es NE y β es CE, entonces μ_1 es NE.
- Si θ es NE y β es PO, entonces μ_1 es PO.
- Si θ es CE y β es NE, entonces μ_1 es NE.
- Si θ es CE y β es CE, entonces μ_1 es CE.
- Si θ es CE y β es PO, entonces μ_1 es PO.
- Si θ es PO y β es NE, entonces μ_1 es NE.
- Si θ es PO y β es CE, entonces μ_1 es PO.
- Si θ es PO y β es PO, entonces μ_1 es PO.

Y las siguientes reglas de inferencia para el módulo 2:

- Si $\dot{\theta}$ es NE y $\dot{\beta}$ es NE, entonces μ_2 es NE.
- Si $\dot{\theta}$ es NE y $\dot{\beta}$ es CE, entonces μ_2 es NE.
- Si $\dot{\theta}$ es NE y $\dot{\beta}$ es PO, entonces μ_2 es PO.
- Si $\dot{\theta}$ es CE y $\dot{\beta}$ es NE, entonces μ_2 es CE.
- Si $\dot{\theta}$ es CE y $\dot{\beta}$ es CE, entonces μ_2 es CE.
- Si $\dot{\theta}$ es CE y $\dot{\beta}$ es PO, entonces μ_2 es CE.
- Si $\dot{\theta}$ es PO y $\dot{\beta}$ es NE, entonces μ_2 es NE.
- Si $\dot{\theta}$ es PO y $\dot{\beta}$ es CE, entonces μ_2 es PO.
- Si $\dot{\theta}$ es PO y $\dot{\beta}$ es PO, entonces μ_2 es PO.

Donde los variables lingüísticas son las siguientes: Negativo (NE), Cero (CE) y Positivo (PO).

C. Entrenamiento

El entrenamiento de la red es realizado usando el algoritmo de propagación dinámica en retroceso (*Dynamic back-propagation* o DBP). Por ello, las siguientes se hacen las adaptaciones en las capas 1 y 4 de la red.

El algoritmo DBP es gobernado por el cálculo de la variación en la función de costo usando la ecuación (12) para el caso de los pesos v , donde la recursividad se complementa usando la ecuación (13) como valor inicial.

$$\frac{dJ}{dv} = \frac{dx_i du}{du dv} + \left(\frac{dx_i du}{du dx} + \frac{dx_i}{dx_{i-1}} \right) \bar{dx}_{i-1} \quad (12)$$

$$\frac{\bar{dx}_1}{dv} = \frac{dx_1 du}{du dv} \quad (13)$$

Para el caso de los pesos en la capa 2 de nuestra red, la ecuación DBP es obtenida usando las derivadas dadas en la ecuación (14).

$$\frac{du}{dv} = \frac{du}{dO_5} \frac{dO_5}{dO_4} \frac{dO_4}{dO_3} \frac{dO_3}{dO_2} \frac{dO_2}{dv} \quad (14)$$

$$\frac{dx_{i-1}}{dv} = \frac{dx_{i-1}}{dO_5} \frac{dO_5}{dO_4} \frac{dO_4}{dO_3} \frac{dO_3}{dO_2} \frac{dO_2}{dv}$$

La adaptación en la capa 5 es más simple, pero nosotros preferimos el método híbrido de entrenamiento, debido a su mayor rapidez de convergencia [5]. El algoritmo de mínimos cuadrados es, por tanto, configurado según (15).

$$dw = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (15)$$

Donde A es la matriz que relaciona w con la salida en la capa 5 y b son los errores retropropagados hasta esta misma capa (por cada iteración).

El entrenamiento se puede realizar para ambos módulos al mismo tiempo, usando el mismo procedimiento anterior, pero

con las matrices aumentadas correspondientemente para la consideración de ambos sistemas.

RESULTADOS

Para validar el diseño, una simulación fue realizada con los siguientes valores: $m_1 = 0.1$ kg, $L_0 = 0.05$ m., $l_1 = 0.1$ m, $l_0 = 6 \times 10^{-5}$ kg.m², $J_1 = 4 \times 10^{-5}$ kg.m². La posición inicial para estos ensayos es $\theta = 2.5\pi/3$ y $\beta = -\pi/2$. Para iniciar el proceso, la base de reglas del sistema de inferencia y una configuración básica son configuradas tal que establezcan el sistema. La respuesta a esta configuración inicial se ilustra en la figura 4. El sistema converge al ángulo deseado, aunque presenta una oscilación apreciable en la base del ángulo.

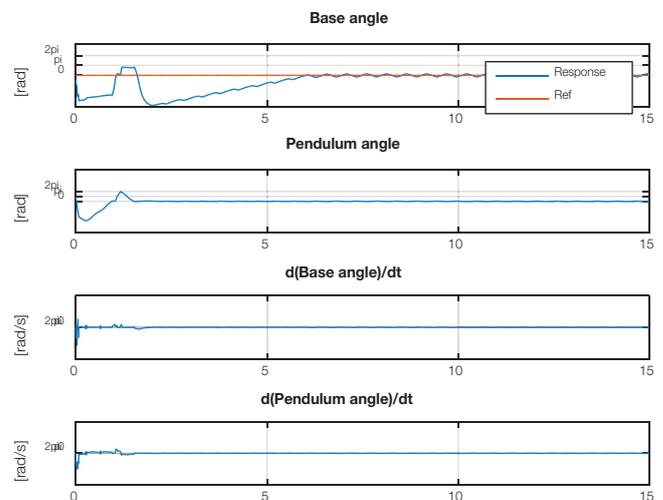


Figura 4. Simulación por el controlador neuro difuso sin entrenamiento. Fuente: Elaboración propia.

Una mejora adicional es conseguida usando el proceso de entrenamiento híbrido para la red. La respuesta para este caso se muestra en la figura 5. Esta última respuesta muestra la mejora de la estabilidad y rapidez del sistema. Además, en la figura 6 se presenta el desempeño ante variaciones en la masa, test que no puede ser replicado con LQR, pues requiere un rediseño de sus ganancias.

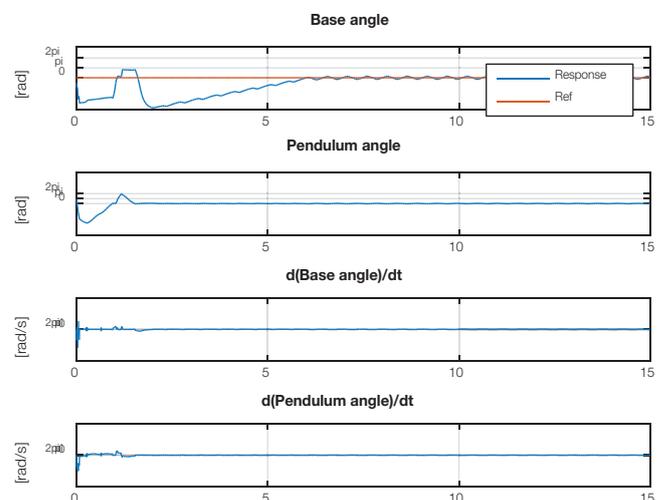


Figura 5. Simulación por el controlador neuro difuso con entrenamiento. Fuente: Elaboración propia.

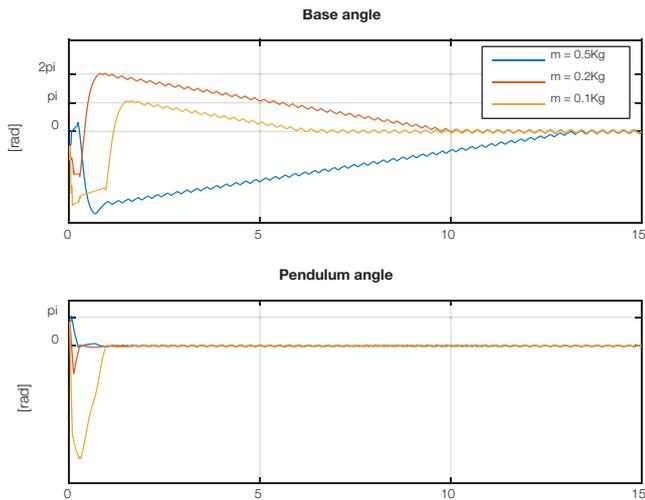


Figura 6. Simulación por el controlador neuro difuso con diferentes masas del péndulo.
Fuente: Elaboración propia.

Para validar el trabajo, se realizó la implementación usando un péndulo invertido rotacional (Figura 7). El actuador es un motor DC que opera la plataforma rotativa. Se dispone también de dos *encoders* para la medición de los ángulos, los algoritmos se implementaron en un microcontrolador Arduino, donde se programaron el LQR [8] y el controlador propuesto, el cual fue entrenado previamente fuera de línea. Los resultados del sistema para la estabilización se muestran en la figura 8.

Además, una comparación adicional para el caso de seguimiento es presentado en la figura 9, donde se usa la señal de test $\sin(t) - 0.2 \sin(4t)$. Cuando el controlador neurodifuso es empleado, se tiene una dinámica más variante, pero una mayor velocidad de convergencia.



Figura 7. Péndulo invertido rotacional.
Fuente: Elaboración propia.

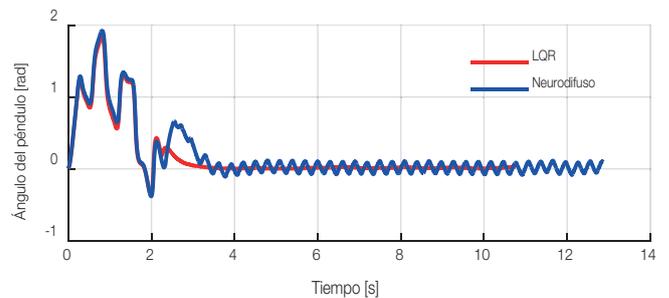
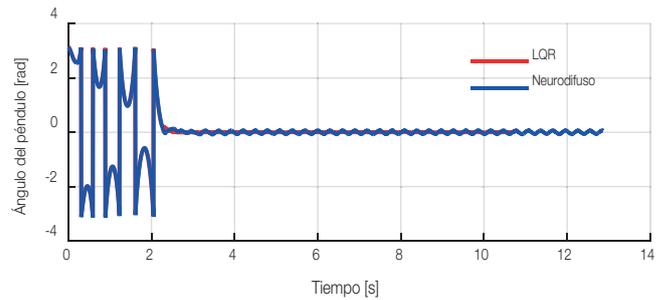


Figura 8. Balanceo vertical del péndulo.
Fuente: Elaboración propia.

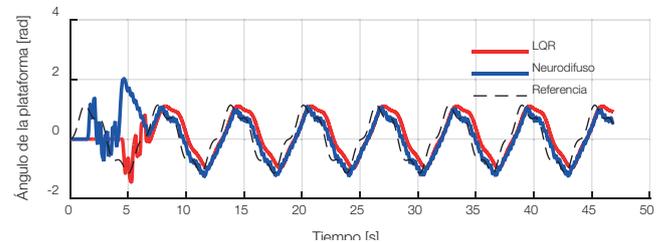
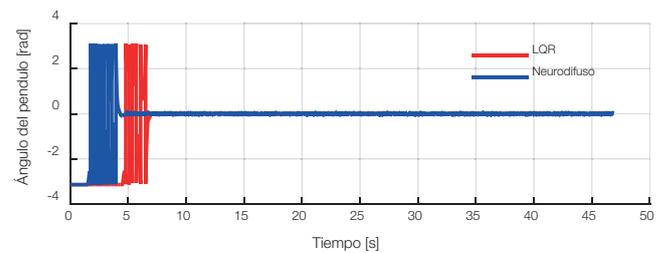


Figura 9. Ensayo de seguimiento con ambos controladores, rojo: LQR, azul: red neurodifusa.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El controlador neurodifuso fue implementado y demostrado satisfactoriamente en el péndulo invertido rotacional. Pudimos comprobar el buen desempeño de este controlador, pues puede ser comparado a la implementación de un LQR en términos de rapidez y estado transitorio.
- El controlador diseñado tiene como principales ventajas su fácil diseño, ya que se basa en reglas lógicas simples. Su capacidad adaptativa es mayor, pues puede ser entrenado, y mantiene su aplicabilidad aun ante variaciones grandes en los parámetros del sistema, como la masa del péndulo sin la necesidad de un rediseño.

REFERENCIAS

- [1] Agrawal, R., y Mitra, R. (2013). Adaptive Neuro Fuzzy Inference Structure Controller for Rotary Inverted Pendulum. *Proceedings of International Conference on Advances in Computing*. Springer: New Delhi, 1163-1170.
- [2] Åström, K., y Furuta, K. (1996). Swinging up a pendulum by energy control. *IFAC Proceedings volumes*. 29(1), 1919-1924.
- [3] Furuta, K., Yamakita, M., y Kobayashi, S. (1992). Swing-up control of inverted pendulum using pseudo-state feedback. *Journal of Systems and Control Engineering*. 206(49), 263–269.
- [4] Grossimon, P., Barbieri, E., y Drakunov, S. (1996). Sliding mode control of an inverted pendulum. *Proceedings of 28th Southeastern Symposium on System Theory*, Baton Rouge, Los Angeles, 248-252.
- [5] Jang, J. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*. 23, 665-685.
- [6] Moreno-Valenzuela, J., Aguilar-Avelar, C., Puga-Guzmán, S., y Santibáñez, V. (2016) Adaptive Neural Network Control for the Trajectory Tracking of the Furuta Pendulum. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 46(12), 3439-3452.
- [7] Rani, M., Selamat, H., Zamzuri, H., Ahmad, F. (2011). PID controller optimization for a rotational inverted pendulum using genetic algorithm. *Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, Kuala Lumpur, 1-6.

[8] Siva, M., Dasu, B., y Ramesh, G. (1995). Design of LQR based stabilizer for rotary inverted pendulum system. *IJCTA*. 9 (29), 21-29.

[9] Tanaka, S., Xin, X., y Yamasaki, T. (2001). New results of energy based swing-up control for a rotational pendulum. *SICE Journal of control, measurement, and system integration*. 4 (6), 394-400.

ACERCA DE LOS AUTORES

Luis Enciso Salas

Graduado con honores como bachiller en Ingeniería Electrónica. Es magíster en Control y Automatización en la Pontificia Universidad Católica del Perú y en Sistemas Espaciales en ISAE-SUPAERO (Francia). Con experiencia en la industria de la automatización y desarrollando actividades en docencia e investigación.

@ lenciso@pucp.pe

Miguel Angel Chávez Luna

Profesional en Electrónica y Sistemas Computarizados por Tecsup. Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad Antonio Ruiz de Montoya. Ha realizado especializaciones en Adquisición de Datos y Control por Computadora en EE. UU., Ingeniería Mecatrónica en México y Brasil, y Sistemas de Automatización en Alemania. Posee certificación *Train the Trainer* dada por Bosch Rexroth de Alemania en Sistemas de Automatización e Industria 4.0. Miembro de IEEE en la sección de Robótica y Automatización. Profesor a tiempo completo en Tecsup, dicta cursos de Automatización Industrial y Sistemas Mecatrónicos.

@ mchavez@tecsup.edu.pe

PAEP

► Programas de Alta Especialización Profesional

Los PAEP están dirigidos a profesionales que buscan complementar su formación para ser líderes en distintas áreas dentro de las empresas.

Beneficios



Pertenecer a la red de especialistas en ingeniería y tecnología



Docentes expertos nacionales y extranjeros



Networking con profesionales de diversos sectores



Sesiones prácticas con desarrollo de casos y proyectos

Se establece un procedimiento práctico para el desarrollo y la puesta en marcha de controladores avanzados para procesos de nivel, desde su concepción, desarrollo inicial en simulación, hasta su implementación práctica.



Modelado borroso de tipo Takagi Sugeno y control predictivo de una planta de nivel

Takagi Sugeno type Fuzzy Modeling and Predictive Control of a Level Plant

RESUMEN

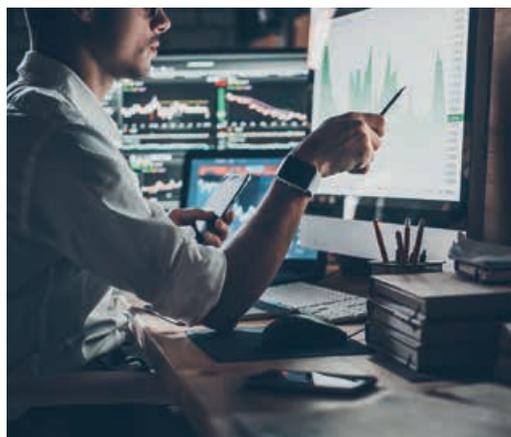
En la presente investigación, se desarrolló el modelado de una planta de nivel usando sistemas de inferencia borrosa de tipo Takagi Sugeno, así como su control empleando un control predictivo discreto basado en modelos (CPDBM). En el proceso de modelado, se demostró la utilidad de los sistemas de inferencia borrosa de tipo Takagi Sugeno al construir modelos que reproduzcan el comportamiento no lineal de plantas en un amplio rango de operación. Varios submodelos del proceso se obtuvieron mediante la estimación de parámetros de modelos físicos usando el estimador de máxima verosimilitud. Basado en esta información, se diseñó un control predictivo discreto basado en modelo (CPDBM) y se realizó su sintonización en Simulink®.

La implementación práctica fue llevada a cabo usando un controlador de la familia LogiX de Allen Bradley®, en el cual se programaron las funciones necesarias para implementar el CPDBM. Los resultados experimentales demuestran un superior desempeño de esta estrategia con respecto a un controlador clásico PID en cuanto a reducción del tiempo de asentamiento y sobreimpulso máximo, mejor filtrado del ruido en la señal de control y comportamiento uniforme sobre un gran rango de operación.

ABSTRACT

This research develops the modeling of a level plant using fuzzy inference systems of Takagi Sugeno type, as well as its control using a Discrete Model Predictive Control (DMPC). In the modeling process, the usefulness of Takagi Sugeno fuzzy inference systems has been demonstrated when constructing models reproducing the nonlinear behavior of plants in a wide range of operation. The sub-models of the process were obtained by estimating parameters using an estimator of maximum verisimilitude. Then, based on this information, a Discrete Model Predictive Control (DMPC) was designed, and afterwards, the tuning was made with Simulink®.

The practical implementation was carried out using a LogiX family Allen Bradley® controller, in which the necessary functions were programmed to implement the DMPC. The experimental results show a superior performance of this strategy compared to a classic PID controller in terms of reduction of settling time, maximum overshoot, better filtering of noise in the control signal, as well as a uniform behavior over a wide range of operation.



Palabras clave

Modelamiento difuso Takagi Sugeno, control predictivo discreto basado en modelos, planta de nivel, controlador lógico programable.

Key words

Takagi Sugeno Fuzzy Modeling, Model-Based Discrete Predictive Control, Level Plant, Programmable Logic Controller.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en el campo de la automatización y control de procesos ha traído consigo la factibilidad de implementación de nuevas estrategias de control avanzadas, con el fin de optimizar el desempeño de los lazos de control ya existentes en la industria. Dentro de estos, sin duda alguna, el control de nivel es el más extendido en industrias, tales como la petroquímica, el tratamiento de aguas residuales, la fabricación de alimentos y bebidas, el sector farmacéutico, los bioprocesos y entre otros.

El control de nivel se torna sumamente importante en procesos donde la uniformidad del producto final depende del control fino de niveles, como, por ejemplo, en procesos de mezclado [1]. Normalmente, estos sistemas son regulados por estrategias convencionales. Así, tenemos que, dentro de las aplicaciones de control para este tipo de procesos, más del 95 % de los controladores son de tipo PI o PID [2]. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, es común encontrar que este controlador posee un desempeño variable debido a las fuertes no linealidades introducidas por los actuadores y los componentes de los procesos debido a que este tipo de controlador lineal es válido para pequeños rangos de operación dentro de su zona de linealización. Es más, su estabilidad se ve fuertemente condicionada ante cambios paramétricos, introducción de tiempos de retardo y perturbaciones [3] [17].

Abordando esta problemática, algunos autores han demostrado que se puede mejorar el desempeño de este controlador incluyéndola dentro de la técnica de ganancia programada [21] [8]. Otros autores recomiendan la aplicación de controladores avanzados, como el control predictivo basado en modelos (CPBM) para procesos de nivel donde existen fuertes no linealidades [7]. Este ha demostrado una gran capacidad de estabilización y robustez ante incertidumbres en procesos con comportamiento dinámico complejo [15]. Esta es la razón de por qué el control predictivo es la técnica de control avanzado más usada en la industria química y petroquímica [9], con aplicaciones emergentes en el sector minero [16], producción de pulpa y papel, bioprocesos, producción farmacéutica, alimentos y bebidas [6].

Para implementar esta estrategia de control, usualmente, se necesita una buena descripción matemática de la planta, que, en muchos casos, solo se consigue mediante la aplicación técnicas de identificación no paramétricas, las cuales describen al proceso en un pequeño rango lineal. Un controlador avanzado diseñado con tal información limitada del proceso puede mostrar en la realidad un comportamiento muy diferente al de lo previsto por las simulaciones o inclusive llegar a la inestabilidad [10]. Una idea para ampliar el rango de validez del modelo es usar descripciones matemáticas locales de la planta para construir un modelo global. Existen muchas formas de integrar estos modelos, pero la más comprensible y transparente al diseñador es el enfoque difuso Takagi Sugeno [18]. La idea detrás de este enfoque es expresar el comportamiento local del proceso a través de las implicaciones de las reglas, las cuales pueden ser integradas estableciendo conjuntos de pertenencia. Este enfoque es altamente práctico y además, está demostrado que los modelos difusos son aproximadores universales de cualquier sistema no lineal continuo [4].

Uno de los objetivos de este artículo es establecer un procedimiento práctico para el desarrollo y la puesta en marcha de controladores avanzados para procesos de nivel desde su concepción, desarrollo inicial en simulación, hasta su implementación práctica. Para esto se propone usar el enfoque difuso Takagi-Sugeno para el desarrollo de un modelo de alta resolución del proceso, el cual será útil a la hora de diseñar el CPBM y asegurar su estabilidad en campo. Otro objetivo importante es demostrar la factibilidad de implementar estrategias de control avanzadas sobre controladores lógicos programables (PLC) industriales, ya que a pesar de que se han reportado aplicaciones tanto a nivel industrial como de instituciones de investigación, el control de modelo predictivo aún no ha alcanzado en la industria la popularidad que su potencial sugiere [5]. Finalmente, se implementan el algoritmo CPDBM y PID en el proceso bajo estudio. Los resultados de ambas técnicas son comparados para, de esta manera, mostrar las mejoras que se pueden conseguir con la técnica aquí desarrollada.

FUNDAMENTOS

Descripción del proceso

El proceso usado para implementar las técnicas de modelado y control predictivo fue el sistema compacto para control de nivel Lukas Nulle IAC 12, cuyas características técnicas se pueden consultar en [11]. Este puede representarse por el diagrama de la figura 1.

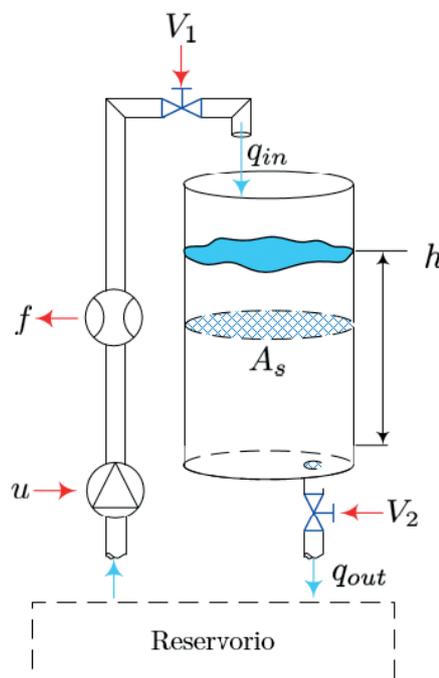


Figura 1. Representación del módulo educativo Lukas Nulle IAC 12. Fuente: Elaboración propia.

El proceso bajo estudio está compuesto de un recipiente de llenado, un transductor de presión (para medir el nivel actual del tanque), un sensor de flujo volumétrico y un reservorio de aprovisionamiento con una bomba incluida. Las variables de perturbación son los porcentajes de apertura de las válvulas en la tubería de alimentación y descarga, las cuales regulan

el caudal de admisión y de evacuación del depósito. En el experimento, se ha considerado como variable de control a la tensión (0 V – 10 V) inyectada a la bomba $\mu(t)$ y como única variable de proceso a la tensión (0 V – 10 V), medida por el transductor de presión que determina el nivel del tanque $h(t)$. Las válvulas V_1 y V_2 fueron ajustadas manualmente al 100 %.

Para esta planta, se considera el siguiente modelo [19]:

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A_s}(u(t) - \mu(t)h(t)^{\alpha(t)}) \quad (1.1)$$

$$y(t) = h(t) \quad (1.2)$$

Donde A_s es una constante que representa el área seccional del tanque, los parámetros $\mu(t)$ y $\alpha(t)$ son valores que dependen de la geometría del depósito o de las condiciones de operación del sistema. A fin de implementar el CPDBM, se tiene que derivar un modelo discreto de la ecuación (1.1 -2). Para ello, se aproxima la derivada usando el método de Euler, con periodo de muestreo Δt , es decir:

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s}[u_k - \mu_k h_k^{\alpha_k}] \quad (2.1)$$

$$y_k = h_k \quad (2.2)$$

Modelado difuso

El enfoque usado para obtener un modelo del proceso en un gran rango de operación fue el método propuesto por Takagi Sugeno [18], el cual es descrito por reglas difusas tipo SI - ENTONCES los cuales representan dinámicas locales del sistema, de modo que, efectuando combinaciones difusas de los submodelos, se puede recrear el comportamiento de todo el sistema no lineal. Por ejemplo, la regla asociada con el i -ésimo submodelo usando un enfoque discreto, puede ser definida de la siguiente forma:

$$SI \ z_{1k} \in M_{i1} \ AND \ \dots \ AND \ z_{pk} \in M_{ip},$$

Entonces

$$h_{k+1} = f_i(h_k, u_k, \mu_k, \alpha_k), \quad i = 1..r$$

$$y_k = g_i(h_k), \quad i = 1..r$$

Donde M_{ij} es el conjunto de pertenencia; r , el número de particiones o reglas; y z_1, \dots, z_p son las variables de entrada del sistema de inferencia difusa. Las ecuaciones recursivas f_i y g_i son los subsistemas asociados a cada regla. En general, el modelo difuso Takagi Sugeno global puede ser expresado de la siguiente forma:

$$x_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^r \{\omega_i(z_k) f_i(h_k, u_k, \mu_k, \alpha_k)\}}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z_k)} \quad (3.1)$$

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^r \{\omega_i(z_k) g_i(h_k)\}}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z_k)} \quad (3.2)$$

Donde:

$$z_k = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_p] \quad (4)$$

$$\omega_i(z_k) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_{jk}) \quad (5)$$

Para cualquier instante k , el término $M_{ij}(z_{jk})$ es el «peso» o grado de pertenencia de z_{jk} en el conjunto difuso M_{ij} .

METODOLOGÍA

A fin de conocer el grado de no linealidad del proceso y de establecer el número de submodelos adecuados para el sistema de inferencia, se procedió a obtener la característica estática del proceso (Figura 2) mediante inyección de señales tipo escalón de diferentes magnitudes a la tensión entregada a la bomba. Se observa que el proceso, efectivamente, describe una dinámica no lineal; sin embargo, dicho comportamiento podría ser aproximado por submodelos lineales, los cuales serían válidos para ciertos rangos de la variable u_k y h_k .

En el proceso de obtención de los submodelos, se tuvo que estimar los parámetros u_k y α_k para cada punto de operación. Estos se estimaron a partir de los datos dinámicos obtenidos del experimento de construcción de la curva estática y empleando el estimador de máxima verosimilitud mediante el *Toolbox IDEAS* [13].

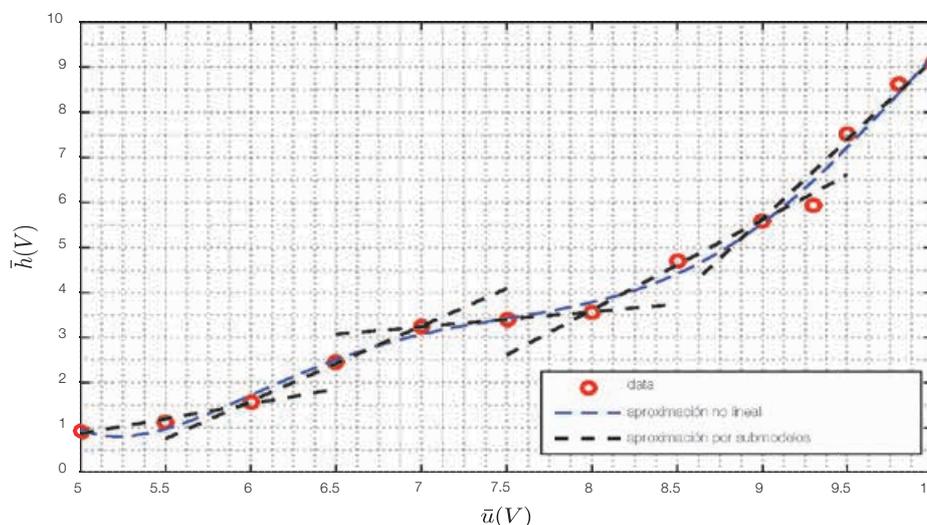


Figura 2. Característica estática del proceso de nivel.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1, se resumen los submodelos obtenidos para cada diferente tensión aplicada a la bomba.

\bar{u}_k	Submodelos
$\bar{u} = 5V$	$f_1 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1514h_k^{1.6683}]$
$\bar{u} = 6V$	$f_2 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1374h_k^{0.2510}]$
$\bar{u} = 7V$	$f_3 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1132h_k^{0.3939}]$
$\bar{u} = 8V$	$f_4 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1459h_k^{0.2712}]$
$\bar{u} = 9V$	$f_5 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1383h_k^{0.2971}]$
$\bar{u} = 10V$	$f_6 = h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_s} [u_k - 0.1023h_k^{0.4134}]$

Tabla 1. Submodelos desarrollados para diferentes tensiones de entrada.
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la tensión inyectada a la bomba u_k determina fuertemente el comportamiento dinámico del proceso, esta es escogida como entrada para el sistema de inferencia difusa, de modo que $z_k = [u_k]$.

Los conjuntos de pertenencia M_i para la tensión aplicada a la bomba u_k han sido construidos usando funciones gaussianas y sigmoideas tal como se observa en la figura 3. En su diseño, se consideró el rango de tensión u_k a la entrada del sistema en el cual el modelo será válido (5 V – 10 V).

Control predictivo

El control predictivo es una técnica de control avanzado que ha sido usada con éxito en industrias tales como la petroquímica, la farmacéutica y la producción de alimentos y bebidas desde la década de los ochenta [9]. Su popularidad radica en que esta técnica puede estabilizar procesos caracterizados por

tener un comportamiento complejo y una dinámica difícil [15]. Para implementar esta estrategia de control, usualmente, se necesita una buena descripción matemática de la planta, la cual se usa para predecir el comportamiento futuro de las salidas, información que es usada por el algoritmo para optimizar la trayectoria futura mediante el cálculo de una secuencia de valores futuros de la señal de control. Sin embargo, la mayoría de los modelos usados no están exentos a tener incertidumbres y errores de modelado. Es por esta razón que la mayoría de controladores industriales llevan embebidos una acción integral. Esta funcionalidad también puede ser incorporada al clásico algoritmo CPBM usando el enfoque de espacio de estados usado en [14].

Todas estas funcionalidades como la incorporación de restricciones, la acción integral y la optimización en línea significan un elevado coste computacional [12], causa por la que muchas veces es imposible su implementación en controladores de uso industrial. Sin embargo, existen enfoques que permiten aliviar la carga computacional; por ejemplo: el uso de representaciones locales del modelo en espacio de estados y omitiendo restricciones sobre las variables sin mucha importancia para el proceso, en cuyo caso la solución del algoritmo es cerrada y, por lo tanto, fácilmente implementable sobre cualquier controlador industrial.

Algoritmo CPDBM

El algoritmo utilizado ha sido adaptado de [20], donde se considera añadir acción integral, a fin de eliminar posibles efectos debido a errores a aproximación y modelado. Se considera inicialmente que los submodelos de la tabla 1 pueden ser llevados a una representación discreta en el espacio de estados, tal que:

$$x_m(k + 1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \tag{6.1}$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \tag{6.2}$$

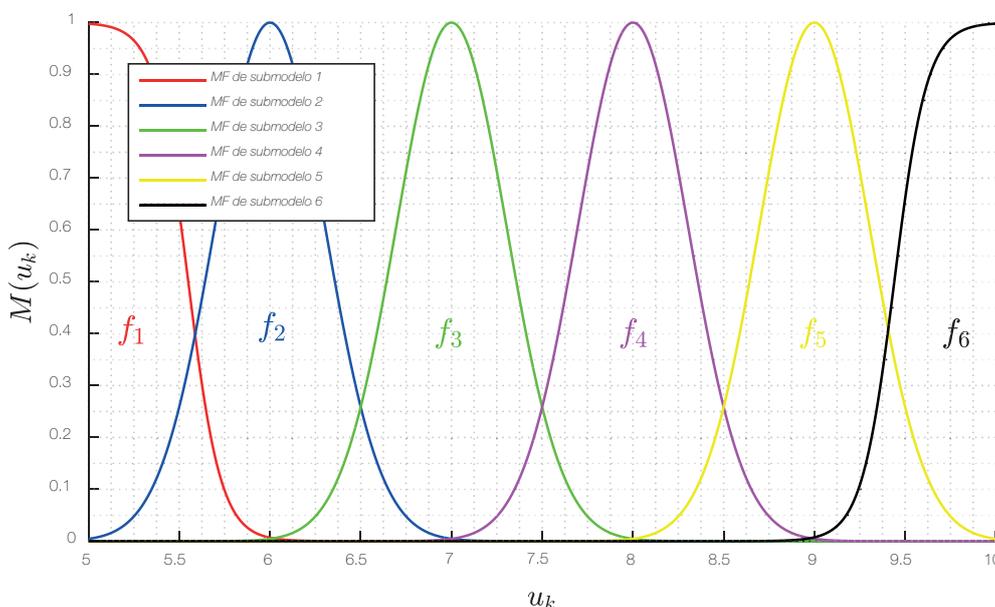


Figura 3. Conjuntos de pertenencia para U_k .
Fuente: Elaboración propia.

Donde $u(k)$ es la variable manipulada o variable de entrada; $y(k)$, la salida del proceso; y $x_m(k)$ el vector variable de estado de dimensión n_1 . Para incorporar la acción integral, debemos obtener la representación aumentada del sistema:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \\ C_m A_m & o_m^T \\ C_m B_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B_m \\ B_m \end{bmatrix} u(k) \quad (7.1)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C \\ o_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Donde $o_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$. El triplete A, B y C será usado en el diseño del CPDBM.

Optimización

Asumiendo que existe un vector R_s , que contiene la información de las referencias, definido por:

$$R_s^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} r(k_i) = \bar{R}_s r(k_i), \quad (8)$$

Si $r(k_i)$ es la referencia en el instante k y N_p , la ventana de optimización u horizonte de predicción, podemos definir la función de coste J como:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (9)$$

Donde:

\bar{R} es una matriz diagonal de la forma $\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c}$ ($r_w \geq 0$); y r_w , la «importancia» o peso que se le da a la ley de control ΔU ; N_c , el horizonte de control; y el vector Y y ΔU están expresados según las ecuaciones (10.1-2).

$$Y = [y(k_i+1|k_i) \ y(k_i+2|k_i) \ y(k_i+3|k_i) \ \dots \ y(k_i+N_c-1|k_i)]^T \quad (10.1)$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i) \ \Delta u(k_i+1) \ \Delta u(k_i+2) \ \dots \ \Delta u(k_i+N_c-1)]^T \quad (10.2)$$

Dado que nuestro sistema es de simple entrada simple salida (SISO), la dimensión de Y es N_p y la dimensión de ΔU es N_c . Para tal caso, la optimización de la ecuación 9, con respecto a la variable de entrada ΔU es una expresión fija, de la cual se puede derivar la señal de control:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (11)$$

Donde:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (12)$$

Combinando la ecuación 11 con la ecuación 8:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (13)$$

El parámetro ΔU contiene las señales de control futuras $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, $\Delta u(k+2)$..., $\Delta u(k+N_c-1)$. Sin embargo, solo el primer componente $\Delta u(k+1)$ de este vector es aplicado en cada instante a la planta, por lo que podemos simplificar (13) de la siguiente forma:

$$\Delta u(k_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \quad (14)$$

Donde se ha hecho:

$$K_y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T \bar{R}_s \quad (15.1)$$

$$K_{mpc} = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F \quad (15.2)$$

La estructura de la ecuación 14 es similar al clásico enfoque de realimentación de estados, donde la ganancia de realimentación es K_{mpc} . En la figura 4, se muestra de forma resumida la estructura del controlador predictivo discreto (CPDBM) con acción integral.

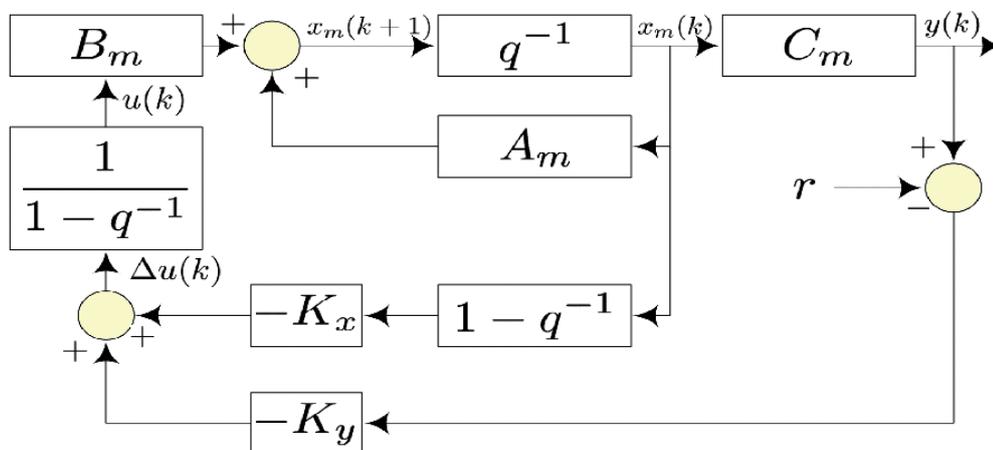


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de control predictivo discreto (DMPC). Fuente: [20].

RESULTADOS

Modelamiento

La figura 5 muestra la implementación del modelo difuso Takagi-Sugeno de las ecuaciones 3.1 y 3.2 en Matlab/Simulink. En la figura 6, se muestra la evaluación del desempeño del modelo propuesto.

Es evidente que el modelo encontrado puede reproducir con suficiente exactitud la dinámica real del proceso. El criterio de evaluación del modelo (fit) fue la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE, por sus siglas en inglés). Se evidencia también que la dinámica real del sistema incorpora pequeños tiempos muertos en puntos cercanos a $u = 5V$, lo cuales por simpleza no fueron considerados en el modelo inicial. Sin embargo, el modelo es capaz de reproducir de forma aceptable la mayor parte de la dinámica principal del proceso.

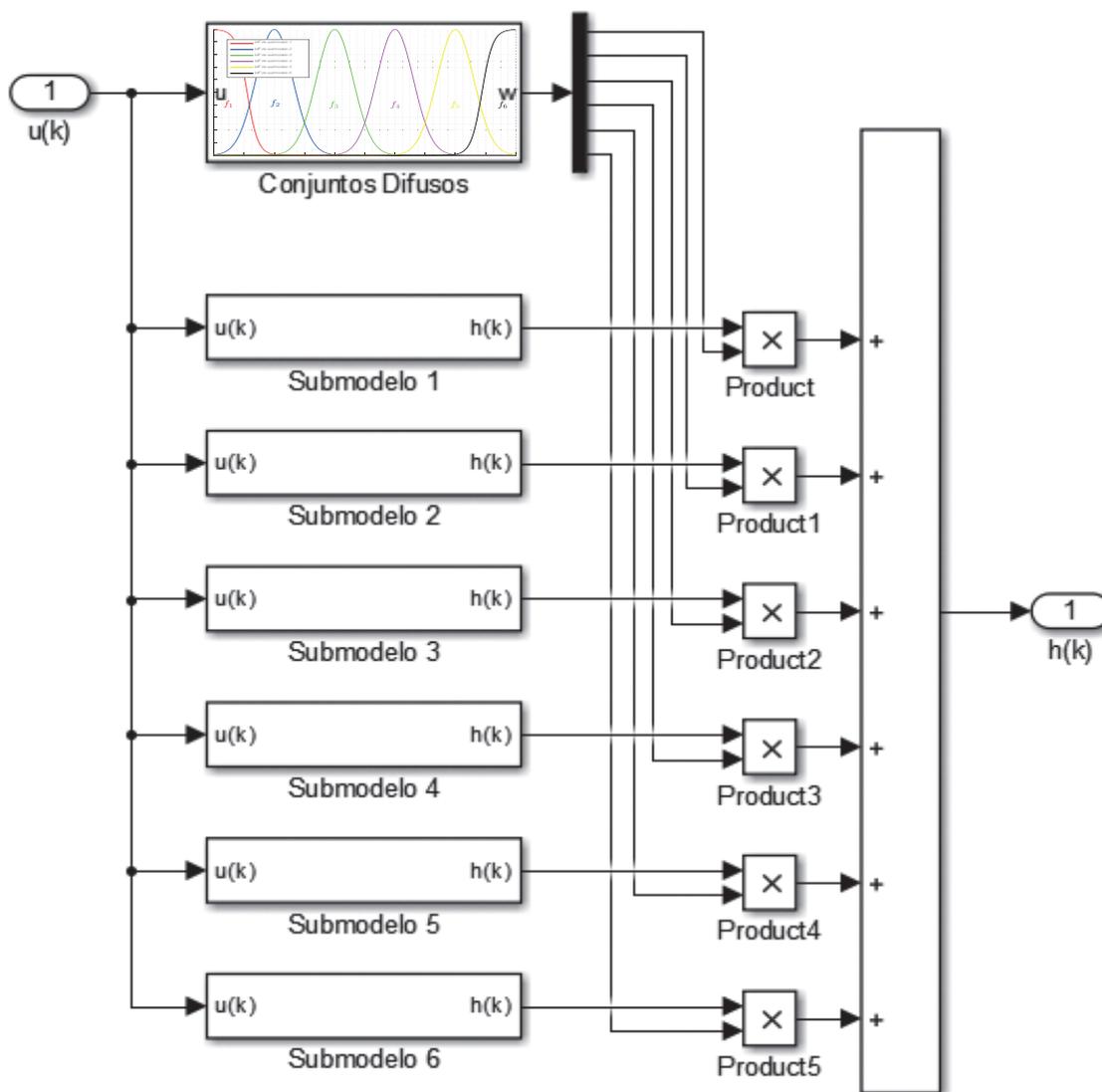


Figura 5. Diagrama de bloques del modelo difuso Takagi Sugeno de la planta de control de nivel Lucas Nulle IAC 12 en Simulink®. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se muestra el desempeño del modelo difuso Takagi Sugeno para predecir el comportamiento de la salida inyectando otros niveles de tensión al proceso diferentes a los que fueron usados para el modelamiento. De los experimentos, se puede concluir que el modelo desarrollado

puede representar con buena exactitud el sistema original en el dominio predefinido. Por lo tanto, puede ser usado para diseñar, sintonizar y evaluar el desempeño *off-line* de controladores que puedan ser incluidos al proceso.

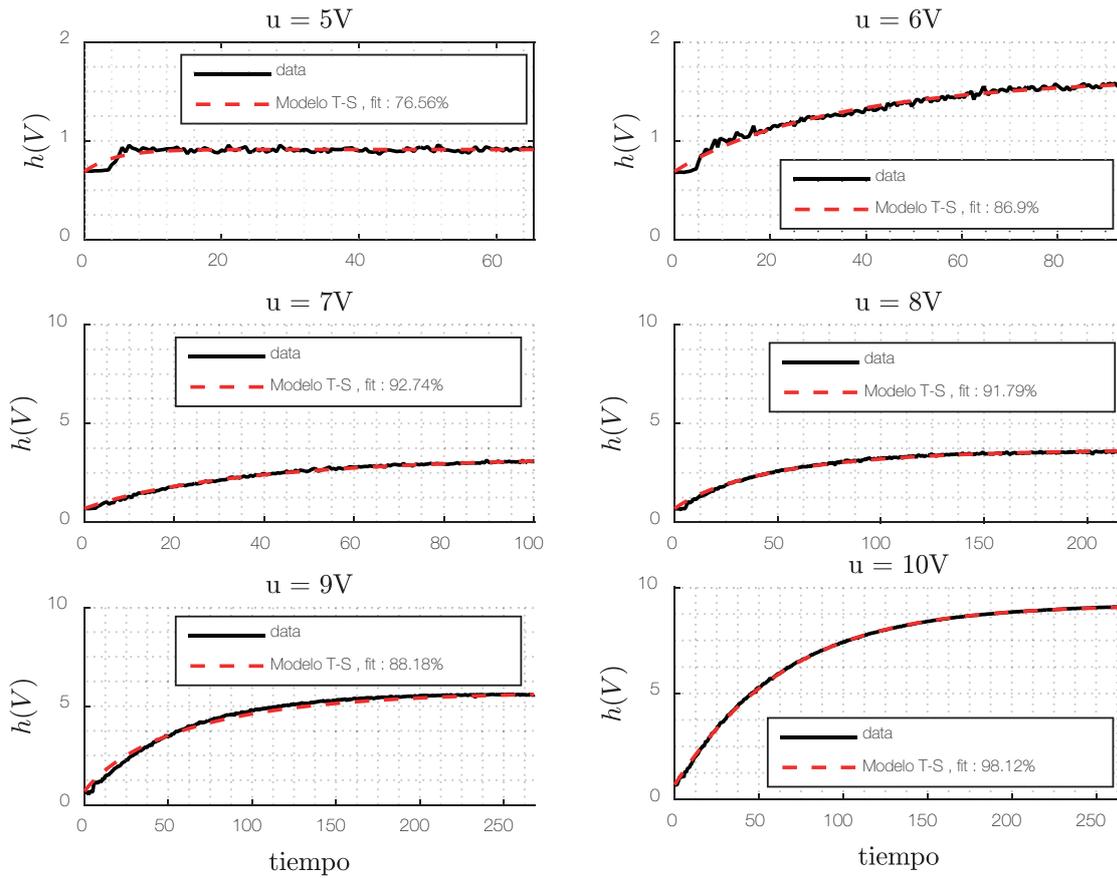


Figura 6. Evaluación del desempeño del modelo difuso Takagi Sugeno para diferentes tensiones a la entrada del sistema. Fuente: Elaboración propia.

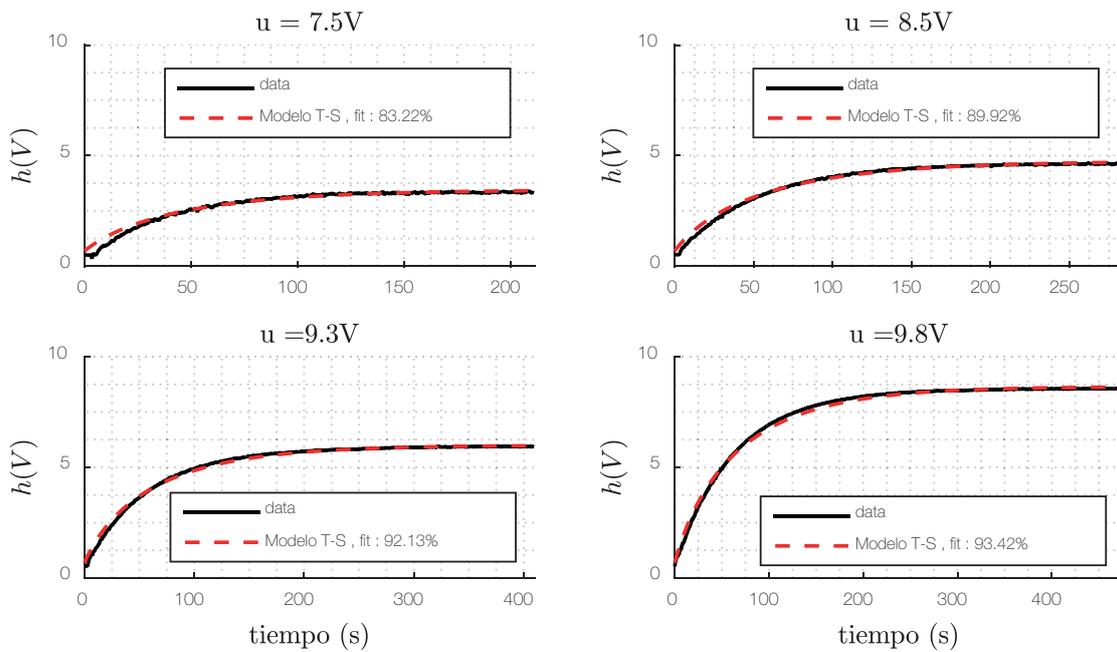


Figura 7. Validación del modelo con otro juego de datos tomados de otros puntos de operación a lo largo de todo el rango de operación del proceso. Fuente: Elaboración propia.

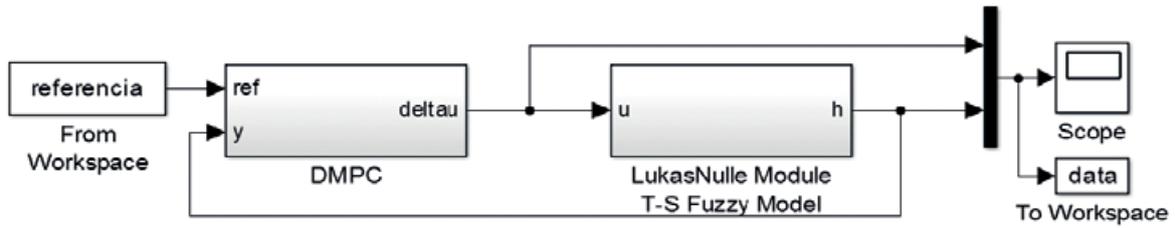


Figura 8. Simulación del controlador DMPC en Matlab/Simulink.
Fuente: Elaboración propia.

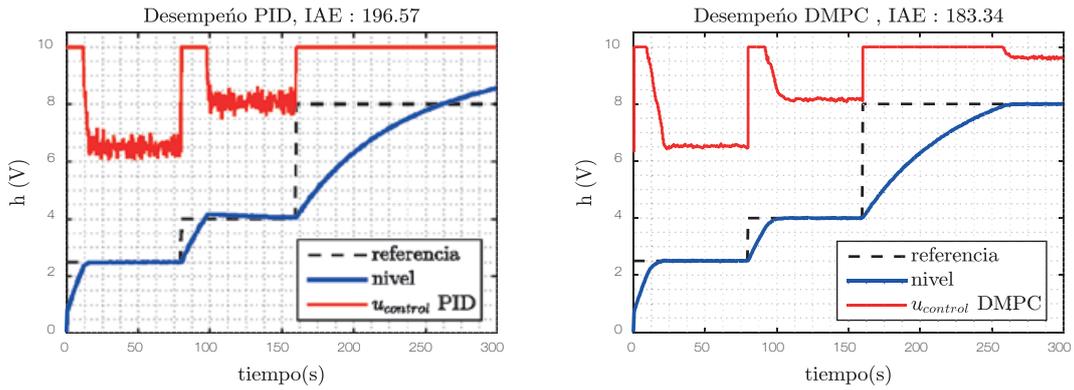


Figura 9. Comparación del desempeño del DMPC y PID discreto en Matlab/Simulink.
Fuente: Elaboración propia.

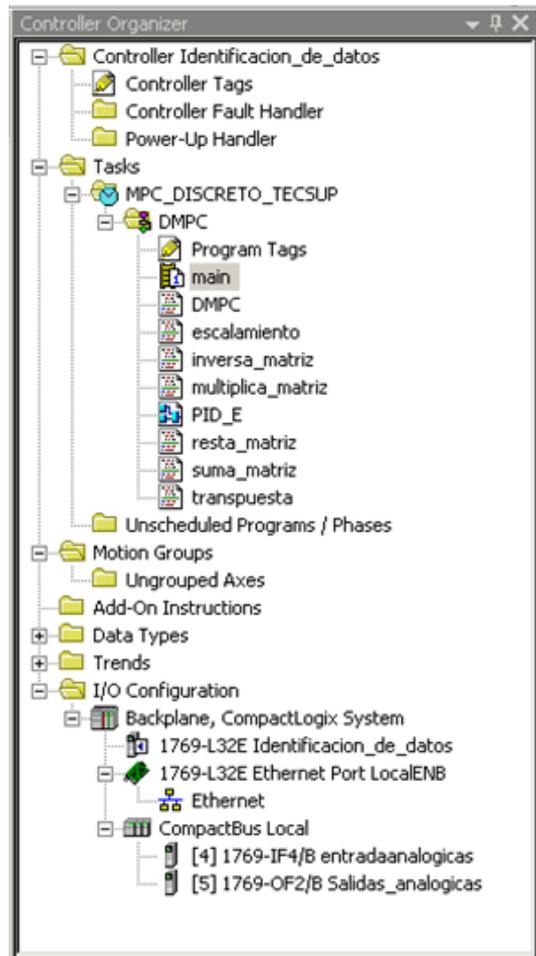


Figura 10. Implementación del Algoritmo CPDBM en Studio 5000®.
Fuente: Software Studio 5000®.

Sintonización del CPDBM en Simulink®

La evaluación inicial del desempeño del controlador se llevó a cabo en Simulink® (Figura 8). Se empleó como planta al modelo difuso validado obtenido anteriormente. Se obtuvo, inicialmente, un conjunto de parámetros y ecuaciones (15.1-2) para lo cual se usaron los submodelos de la tabla 1, donde se evidenció un similar desempeño en todos los casos. Los mejores resultados se obtuvieron fijando el horizonte de predicción y el horizonte de control .

Los valores de y con los cuales se realizó la simulación fueron los siguientes:

$$K_y = \begin{bmatrix} 2.5302 \\ 1.7408 \\ 1.0706 \\ 0.5133 \end{bmatrix} \quad K_{mpc} = \begin{bmatrix} 23.0706 & 2.5302 \\ 20.7485 & 1.7408 \\ 18.4958 & 1.0706 \\ 16.3677 & 0.5133 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para verificar la efectividad de la técnica de control propuesta, se evaluó su desempeño sobre un gran rango de operación; además, se comparó con un controlador PID bien sintonizado. El criterio de evaluación para ambos controladores fue la integral del error absoluto (IAE, por sus siglas en inglés). El tiempo de simulación fue fijado en 300 segundos. Los resultados de la figura 9 muestran que el PID discreto presenta sobreimpulsos y desempeño variable según la región de operación, mientras que el CPDBM presenta el menor tiempo de asentamiento, ausencia de sobrepicos y menor ruido en la señal de control. Hasta el tiempo de simulación, el error acumulado por el PID discreto fue 7.22 % mayor al CPDBM. De las simulaciones, se concluye que el CPDBM soluciona los problemas de variabilidad del desempeño de los controladores tradicionales verificando su superior desempeño en un gran rango de operación.

Resultados experimentales

El algoritmo CPDBM fue implementado en el PLC Compact Logix L32E, de la familia Allen Bradley, un controlador de uso extendido en el sector industrial peruano. Este PLC incluye la facilidad de ser programado en 4 de los 5 lenguajes del estándar IEC 1131-3 bajo el *software* Studio 5000®. Debido a la necesidad de programar funciones y manipular arrays se usó *texto estructurado*. En la figura 10, se observa la estructura las tareas, los programas, las rutinas y las subrutinas que implementan el algoritmo CPDBM.

Para comparar el desempeño del CPDBM, se diseñó, adicionalmente, un controlador PID, cuyos parámetros iniciales fueron encontrados con las herramientas de autosintonización del bloque PID ENHANCED, función ya implementada en Studio 5000®. Se elaboró una secuencia de referencias común procurando las mismas condiciones iniciales para evaluar el desempeño de ambos controladores. Los datos se recolectaron usando la herramienta TREND y se exportaron a Matlab para su análisis. Los resultados de la implementación se muestran en las figuras 11.a y 11.b.

En la tabla 2, se resumen las características más importantes en el desempeño de ambos controladores. Se verifica que el CPDBM tiene un mejor desempeño que el tradicional PID en términos de reducción del sobreimpulso, el tiempo pico, el tiempo de asentamiento y de la integral del error absoluto (IAE); además, mejora la calidad de la señal de control al filtrar mejor el ruido proveniente del sensor. Otro resultado notorio es que tanto el CPDBM como el PID muestran un comportamiento similar al de las simulaciones efectuadas en Simulink®, confirmando, de nuevo, la validez del modelo desarrollado anteriormente.

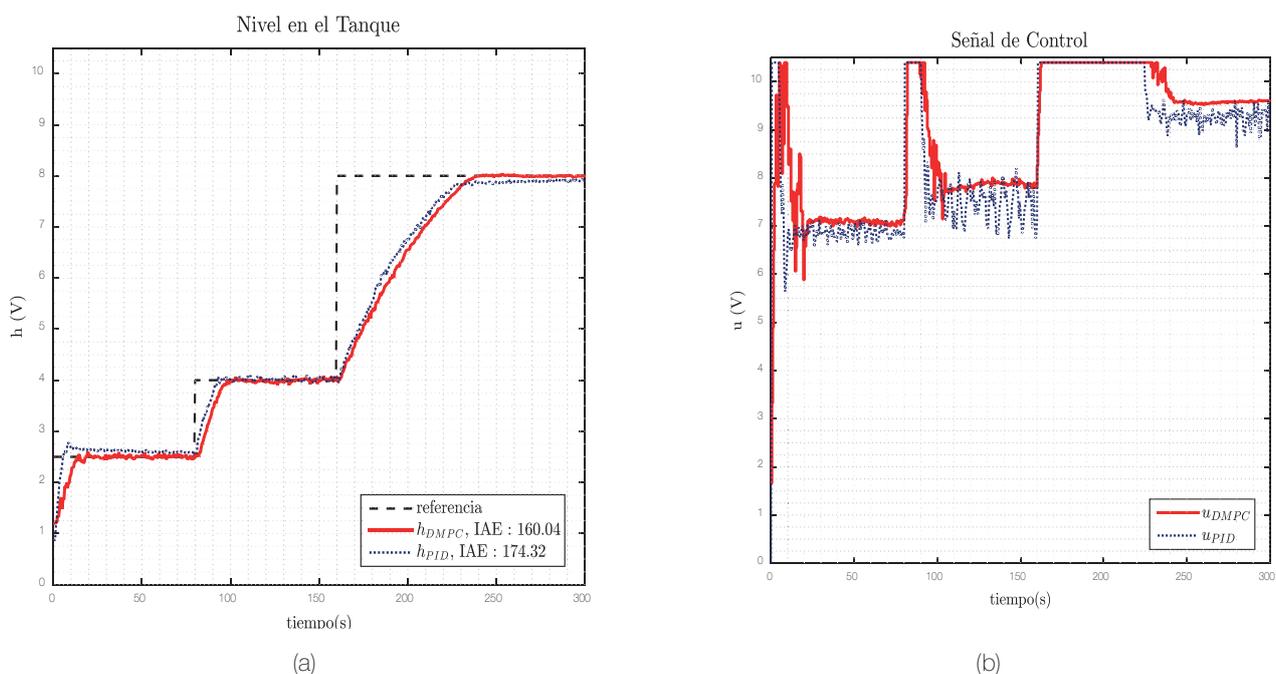


Figura 11. (a) Resultados de la implementación del DMPC con la planta real y comparativa con un PID bien sintonizado. (b) Comparativa de la señal de control generada por el DMPC y PID.

Fuente: Elaboración propia.

Técnica	Sobreimpulso %	Tiempo pico (s)	Tiempo de asentamiento (s)	IAE	Ruido en señal de control
PID	11.2	8.5	>80	172.32	moderado
DMPC	0	0	12.5	160.02	bajo

Tabla 2. Evaluación del desempeño de los controladores bajo un escenario real.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló y se validó un modelo que es capaz de recrear el comportamiento de la planta de nivel sobre un gran rango de operación, y se verificó la utilidad del enfoque Takagi Sugeno a la hora de simplificar los cálculos y procedimientos. Basados en esta información, se propuso controlar el nivel de la planta usando un *controlador predictivo discreto basado en modelos* (CPDBM).
- Este algoritmo fue implementado en el controlador industrial Compact Logix L32E usando *texto estructurado*. El CPDBM fue comparado con un controlador PID correctamente sintonizado en términos de respuesta temporal como tiempo de asentamiento, sobreimpulso, tiempo pico y en términos de error total acumulado bajo el índice de integral del error absoluto (IAE).
- De los resultados experimentales, se concluye que el CPDBM posee un mejor desempeño e incrementa la uniformidad en la respuesta bajo diferentes puntos de operación con respecto al desempeño mostrado por el PID.
- Como trabajo futuro, se plantea investigar el uso del modelo desarrollado para el diseño de un sistema de diagnóstico, que pueda detectar fallos en sensor, actuador, tubería y tanque, el cual pueda ser integrado, ya sea a un sistema de supervisión avanzado o a un controlador adaptativo tolerante a fallos.

REFERENCIAS

- [1] Ansari, A. T., Raja, K. T., Sujitha, K., Kaa, H., y Abirami, S. (2014). Assessment Of Diverse Controllers For A Cylindrical Tank Level Process. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1 (6), 82-86.
- [2] Åström, K., y Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Carolina del Norte: Instrument Society of America.
- [3] Atherton, D. P., y Majhi, S. (Junio de 1999). Limitations of PID controllers. *The 1999 American Control Conference*. Conferencia llevada a cabo en IEEE Control Systems Society, San Diego, California. 3843-3847.
- [4] Buckley, J. (1992). Universal fuzzy controllers, *Automatica (Journal of IFAC)*, 28 (6), 1245-1248.
- [5] Camacho, E., y Alba, C. (2013). *Model predictive control*. Londres: Springer Science & Business Media.
- [6] Dotoli, M., Fay, A., Miskowicz, M., y Seatzu, C. (2015). A Survey on Advanced Control Approaches in Factory Automation. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (3), 394-399.
- [7] Escobar, E. Salgado, J, Nicanor, Q. (octubre, 2014). Gain Scheduled - Model Predictive Control Applied to Nonlinear Systems, *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA 2014)*. Congreso llevado a cabo en Cancún, Quintana Roo, México. 899-904.
- [8] Fini, A., Gogani, M., y Pourgholi, M. (Setiembre, 2015). Fuzzy gain scheduling of PID controller implemented on real time level control. *Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS), 2015 4th Iranian Joint Congress*. Congreso llevado a cabo en IEEE, Zahedan, Iran. 1-5.
- [9] Qin, J., y Badgwell, T. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control engineering practice*, 11(7), 733-764.
- [10] Kamyar, M. (2008). *Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control. Industrial Automation, Robotics and Artificial Intelligence*. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University.
- [11] Lucas Nülle (s. f.): Compact level control kit including vessel, tank, pump and sensors. Recuperado de <https://www.lucas-nuelle.com/317/pid/13909/apg/7474/Compact-level-control-kit-including-vessel,-tank,-pump-and-sensors-.htm>
- [12] Marruedo, D. (2002). *Control predictivo de sistemas no lineales con restricciones: estabilidad y robustez* [Disertación doctoral], Universidad de Sevilla.
- [13] Muñoz-Tamayo, R., Laroche, B., Leclerc, M., & Walter, E. (2009). IDEAS: a parameter identification toolbox with symbolic analysis of uncertainty and its application to biological modelling. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(10), 1271-1276.
- [14] Ricker, N. (1991). Model-predictive control: state of the art. Proc. Fourth International Conference on Chemical Process Control, Texas. 271-296.
- [15] Rivas Pérez, Sotomayor Moriano, Prada Moraga. (Noviembre, 2000). Control predictivo adaptivo robusto. *IX Congreso Latinoamericano de Control Automático*. Congreso llevado a cabo en Cali, Colombia. 10-15
- [16] Sbábaro, D., y Del Villar, R. (Eds.). (2010). *Advanced control and supervision of mineral processing plants*. Londres: Springer Science & Business Media.

- [17] Sung, S. W., y Lee, I. B. (1996). Limitations and countermeasures of PID controllers. *Industrial & engineering chemistry research*, 35(8), 2596-2610.
- [18] Takagi, T., y Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 15(1), 116-132.
- [19] Viveros, R., Yuz, J., y Ibacache, R. (2014). Estimación simultánea de estado y parámetros para un sistema no lineal variante en el tiempo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 11(3), 263-274.
- [20] Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Londres: Springer Science & Business Media.
- [21] Wang, M., y Crusca, F. (2002). Design and implementation of a gain scheduling controller for a water level control system. *ISA transactions*, 41(3), 323-331.

Procesos. Ha recibido entrenamiento en *Process Control System* de Siemens (PCS7), DCS – DeltaV de Emerson Process Management y DCS Invensys de Foxboro. Es especialista en Instrumentación, Automatización y Control de Procesos, Sistemas Integrados de control DCS & SCADA y Gestión de Proyectos de Automatización en Tecsup. Ha participado en el programa de intercambio en la Universidad de Purdue. Cuenta con certificación del idioma inglés por la Universidad de Cambridge. Actualmente, se desempeña como docente a tiempo completo en el área de Electricidad y Electrónica en Tecsup Sede Sur.

@ omoreno@tecsup.edu.pe

Andrés Oswaldo Morocco Apfata

Ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, con estudios de maestría en Ingeniería de Control y Automatización por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Miembro del Colegio de Ingenieros del Perú. Posee experiencia en sistemas automáticos de control, programación de PLC e instrumentación industrial. Actualmente, es docente del área de Electrónica y Automatización en Tecsup Sede Sur.

@ amorocco@tecsup.edu.pe

Hernando Prada Rojas

Ingeniero electrónico por la Universidad Católica de Santa María, magíster en Instrumentación y Control Automático por la Universidad Nacional de San Agustín, y con estudios concluidos de doctorado en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad Nacional de San Agustín. Asimismo, posee una segunda especialidad en el Programa de Especialización para Profesionales en Instrumentación, Automatización y Control de Procesos por Tecsup Sede Sur, y la certificación internacional de inglés por la Universidad de Cambridge. Con más de cuatro años de experiencia laboral como coordinador y *planner* de áreas asociadas a electrotecnia industrial y calidad e innovación educativa. Cuenta con más de diez años de experiencia como docente en las áreas de automatización, control, instrumentación, electrónica, electricidad e informática en los programas de formación regular, programas de capacitación continua y programas de especialización. Además, ha participado en proyectos para el sector minero, implementación de módulos de mantenimiento (SAP) y desarrollo de líneas de carrera, y evaluación para técnicos eléctricos e instrumentistas. Actualmente, es el jefe del Departamento de Electricidad y Electrónica de Tecsup Sede Sur.

@ hprada@tecsup.edu.pe

ACERCA DE LOS AUTORES

Julio Alejandro Mosaja Churata

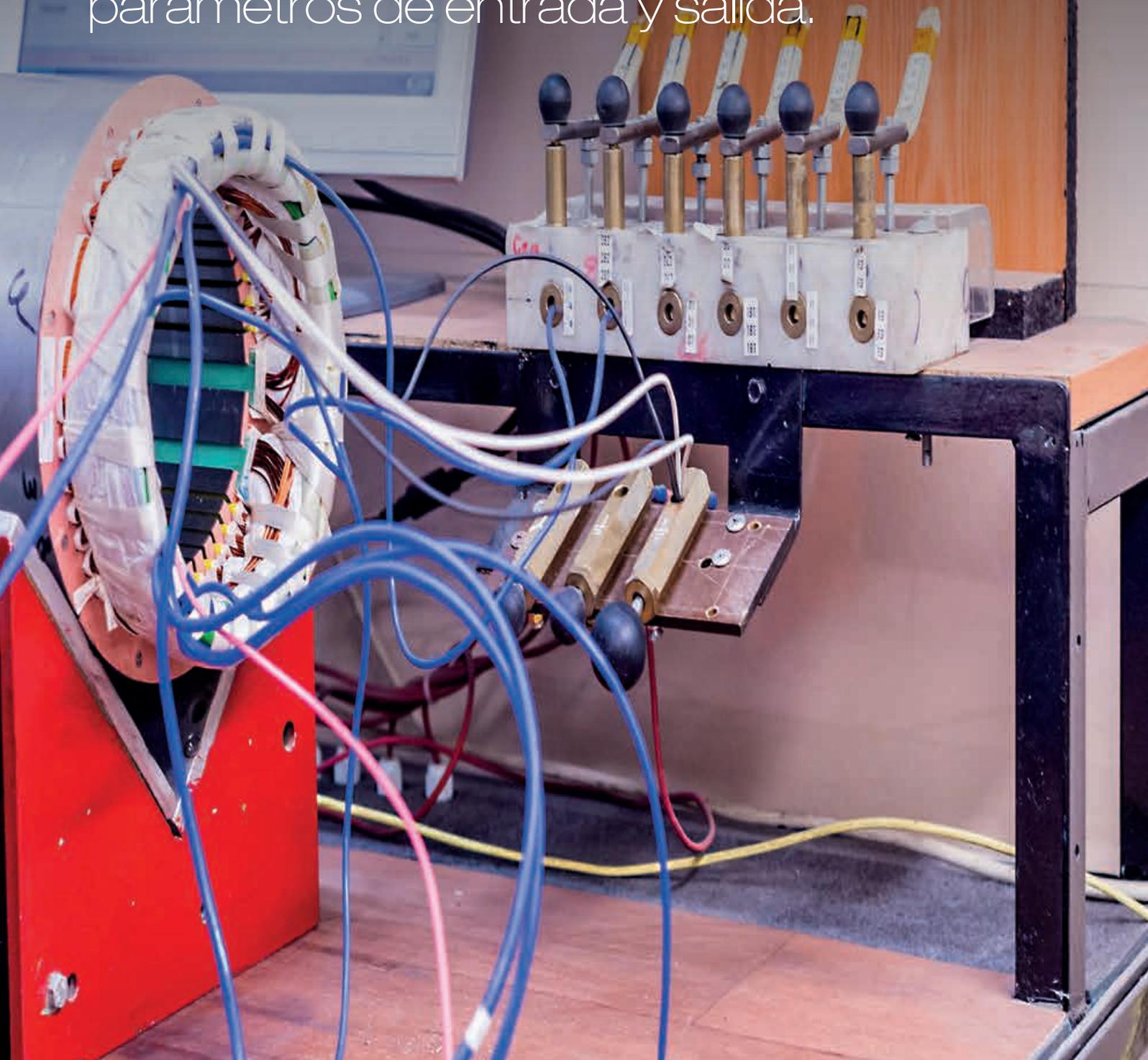
Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y magíster en Ingeniería de Control y Automatización por la Pontificia Universidad Católica del Perú, graduado con mención sobresaliente, y es especialista en Gestión de Proyectos por la misma Universidad. Ha participado en diferentes proyectos de investigación aplicada financiados por FINCyT y CONCYTEC en el campo del diagnóstico y control tolerante a fallos aplicados a procesos industriales. Ha recibido entrenamiento técnico en DCS Invensys de Foxboro y PCS7 de Siemens en Tecsup, y CISCO CCNA v6 por la Universidad Católica San Pablo. Posee experiencia laboral tanto en proyectos como en el área de mantenimiento eléctrico instrumental, desempeñándose en el sector minero e industrial. Actualmente, capacita a profesionales en el área de automatización, instrumentación y control en Tecsup Sede Sur.

@ jmosaja@pucp.edu.pe

Edmundo Oswaldo Moreno Arévalo

Ingeniero electrónico de la Universidad Católica Santa María en la especialidad de Automatización y Control. Candidato a maestro en Ciencias de Ingeniería Electrónica con mención en Instrumentación y Control de

Un estudio que compara las funciones y analiza la respuesta de transferencia de un motor DC, obtenidas mediante dos procedimientos distintos: la respuesta del voltaje de armadura y la velocidad angular como parámetros de entrada y salida.



Obtención de la función de transferencia de un motor de corriente continua, basada en mediciones experimentales

Obtaining the Transfer Function of Continuous Current Motor, based on Experimental Measurements

RESUMEN

En el presente artículo, se presentan los resultados del estudio para la obtención de la función de transferencia de un motor de corriente continua basándose en la respuesta del voltaje de armadura y la velocidad angular como parámetros de entrada y salida.

En la segunda parte, se mostrará cómo varían dos de sus parámetros, la corriente de armadura y la velocidad angular, frente a las variaciones del voltaje de armadura; datos tomados mediante mediciones realizadas en el motor. Se trabaja sobre tres motores distintos, dos de imán permanente y uno de estator bobinado.

En la tercera parte, se realizará un modelo analítico del motor con base en su modelo de representación electromecánica y se define la función de transferencia.

En la cuarta parte, se ejecutarán mediciones para determinar experimentalmente los parámetros del motor y encontrar la función de transferencia basándose en ellos.

En la quinta parte, se usará el *toolbox* «*Ident*» de MATLAB para encontrar la función de transferencia del motor y comparar con el obtenido mediante métodos experimentales.

En la sexta parte, se darán las conclusiones a los resultados obtenidos.

ABSTRACT

This paper shows the results of the study to obtain the transfer function of a DC motor, based on the response between the armature voltage and the angular speed, as input and output signals.

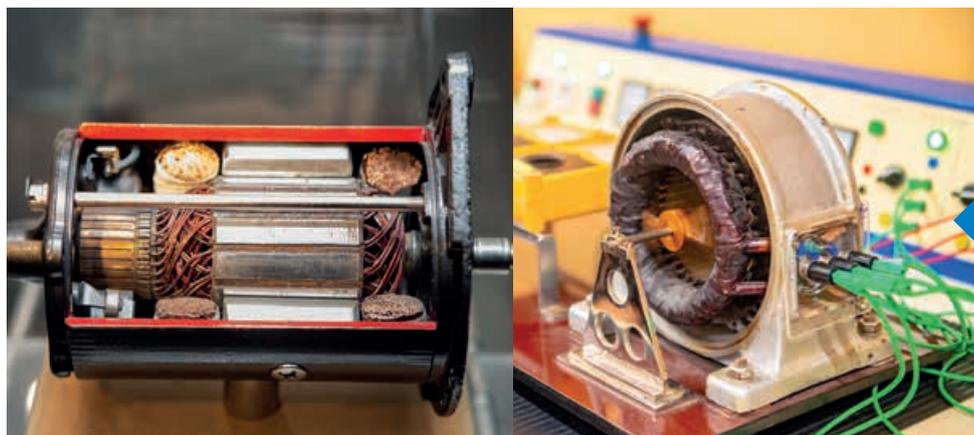
In the second part, it is shown how two of its parameters, the armature current and the angular speed, change with the variations of the armature voltage; these data have been taken by measurements made in the motor. The task is made on three different motors, two of permanent magnet and one of winding stator.

In the third part, it is made an analytical model of the motor based on its electromechanical model representation and the function of transfer is defined as well.

In the fourth part, measurements are made to determine the motor parameters by experimental methodology and find the transfer function based on them.

*In the fifth part, MATLAB «*Ident*» toolbox is used to find the transfer function of the motor and compare it with the obtained through experimental methods.*

In the sixth part, there are given the conclusions on the results obtained.



Palabras clave

Motor DC, parámetros de motor DC, modelo experimental de motor DC, Matlab.

Key words

DC Motor, DC Motor Parameters, DC Motor Experimental Model, Matlab.

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo realizaremos un estudio comparando las funciones de transferencia de un motor DC obtenidas mediante dos procedimientos distintos y analizaremos la respuesta de dicha funciones de transferencia. Para ello usaremos las mediciones de sus parámetros tanto de entrada como de salida. En nuestro caso los parámetros a medir serán voltaje de entrada o excitación en armadura (V_a), la corriente de armadura (I_a) y la velocidad angular (w). [1]



Figura 1. Modelo del motor DC.
Fuente: Elaboración propia.

Consideraremos aplicar esto a los motores DC de imán permanente y de estator bobinado, Teniendo en cuenta que en este último las condiciones de trabajo de la parte de campo estarán ajustadas a las determinadas por sus datos de placa y que las mantendremos constantes.

El procedimiento a seguir para este estudio consistirá en realizar tablas de mediciones de tres parámetros para cada caso y luego graficarlos para observar las respuestas y sus tendencias en su comportamiento. Tomaremos como referencia el voltaje aplicado al motor en los terminales de armadura el cual variaremos desde 0 V. al valor de voltaje que permite obtener su velocidad nominal o que sobrepase los 3,200RPM. Dependiendo de los alcances de cada motor.

FUNDAMENTOS

Datos referenciales y mediciones

Motor M1:

En esta parte el primer motor a usar es un motor de la marca *Mabuchi Motors*. El modelo de motor usado es EG-530 KD-2F, Los datos de placa del motor especifican 12VDC, 1600/3200 RPM CW, al que llamaremos motor M1. A partir de los datos de placa lo alimentaremos sin carga en el eje y en con voltajes que variarán en 0.5 V en cada incremento midiendo su corriente y velocidad angular.

V_a (V)	I_a (A)	w (RPM)
0	0	0
0.5	0	0
1	0.016	123
1.5	0.0217	290
2	0.0317	568
2.5	0.0417	845
3	0.0483	1038
3.5	0.0563	1271
4	0.0629	1468

4.5	0.071	1705
5	0.0811	2022
5.5	0.087	2225
6	0.0952	2497
6.5	0.1015	2728
7	0.1073	2974
7.5	0.1132	3209
8	0.1204	3502
8.5	0.1267	3749
9	0.1312	3960
9.5	0.137	4243
10	0.1422	4460
10.5	0.1471	4746
11	0.1543	5059
11.5	0.1594	5312
12	0.1622	5532

Tabla 1. Valores de medición del motor 1.
Fuente: Elaboración propia.

Si graficamos los valores de la I_a Vs V_a tendremos la gráfica mostrada en la figura 2.

En la que se aprecia que la variación de la corriente no es lineal, hay un ligero curvamiento hacia la parte superior, toma una característica algo exponencial o cuadrática. Esto es importante cuando se quiere modelar este comportamiento pues buscaremos ajustar la curva a ecuaciones de ese tipo.

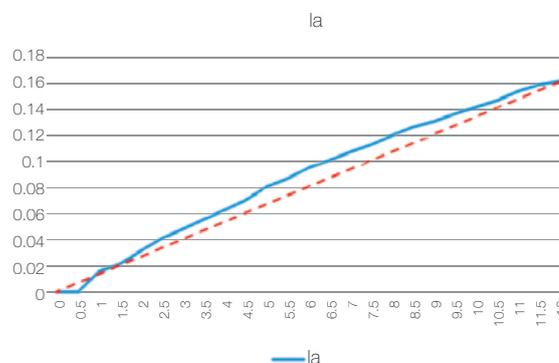


Figura 2. Respuesta I_a Vs V_a , en motor DC M1.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la velocidad observamos en cambio una respuesta diferente en su evolución al incrementar el voltaje de armadura. La figura 3 muestra este comportamiento.

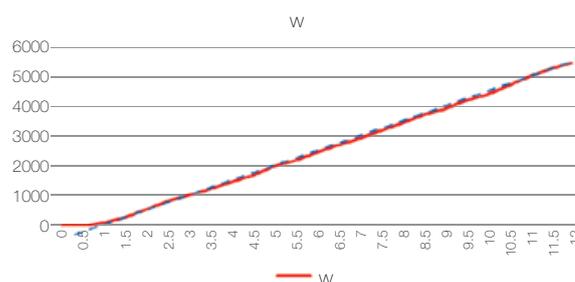


Figura 3. Respuesta w Vs V_a en motor DC M1.
Fuente: Elaboración propia.

Para la velocidad, se observa una tendencia muy lineal en casi todos sus valores a excepción de valores cercanos a cero.

Si ahora establecemos la relación entre la velocidad angular (w) y la corriente de armadura (I_a), observamos que se mantiene la tendencia lineal en la relación entre ambos parámetros. Como se aprecia en la figura 4.

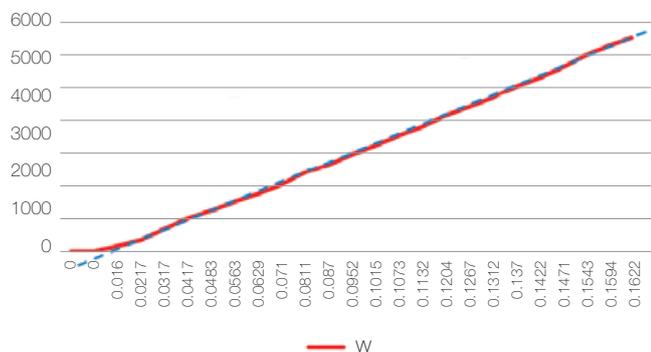


Figura 4. Respuesta w Vs V_a en motor DC M1.
Fuente: Elaboración propia.

Motor M2:

Para el segundo motor, tenemos uno del cual no conocemos los datos de fábrica y solo sabemos que su voltaje de armadura nominal es 12 voltios, esta situación es común cuando usamos motores reciclados. Le realizamos las mismas pruebas de medición que al motor M1 y se obtuvieron los siguientes resultados.

V_a (V)	I_a (A)	w (RPM)
0	0	0
0.5	0	0
1	0.1655	0
1.5	0.2567	0
2	0.2982	0
2.5	0.1407	250
3	0.1595	316
3.5	0.1641	405
4	0.1646	475
4.5	0.168	556
5	0.1739	630
5.5	0.1809	710
6	0.1855	783
6.5	0.1898	861
7	0.1898	920
7.5	0.1898	1006
8	0.1919	1060
8.5	0.1817	1140
9	0.1852	1221
9.5	0.1864	1282
10	0.1953	1368
10.5	0.1953	1441
11	0.2018	1510
11.5	0.2053	1572
12	0.2062	1690

Tabla 2. Valores de medición del motor 2.
Fuente: Elaboración propia.

Para la relación entre la corriente y el voltaje aplicado a armadura encontramos la gráfica vista en la figura 5.

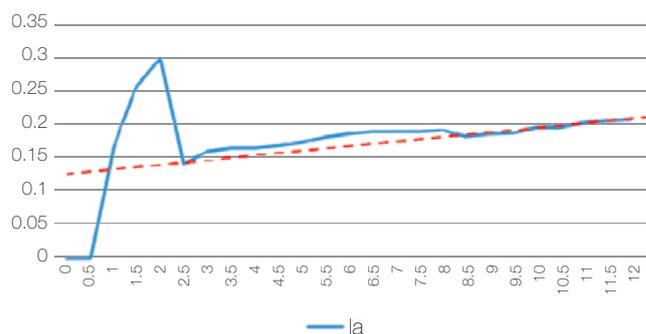


Figura 5. Respuesta I_a Vs V_a en motor DC M2.
Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia una marcada tendencia no lineal y un comportamiento muy diferente a bajas velocidades, en especial para voltajes menores a 2.5 V, en el que a pesar de no moverse la corriente se incrementa dando la impresión de estar frenado el eje. Sin embargo esto se puede explicar considerando que el campo magnético del estator esté actuando como un freno para evitar que el rotor se mueva, hasta que es vencido por la fuerza de empuje al incrementar la corriente de armadura. Luego de ello, la corriente cae y presenta muy poca variación al incremento de la tensión. Pero aun en esta parte la tendencia es muy poco lineal.

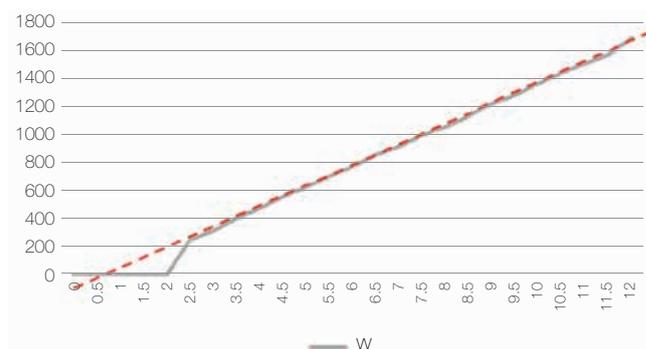


Figura 6. Respuesta w Vs V_a en motor DC M2.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se muestra la relación entre la velocidad angular y el voltaje de armadura, en este caso vemos que la tendencia es muy lineal hasta voltajes de armadura de 2.5 V. Por debajo de este valor el motor no se mueve.

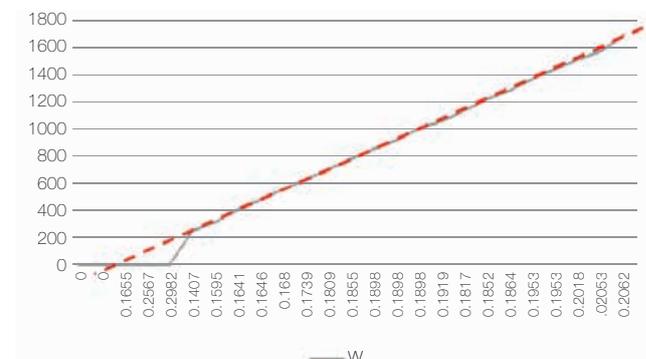


Figura 7. Respuesta w Vs V_a en motor DC M2.
Fuente: Elaboración propia.

La relación velocidad angular y corriente de armadura conserva la linealidad en casi toda la extensión de los datos.

Motor M3:

Para el caso del motor M3, se ha considerado uno de estator bobinado con datos de placa: 0.9KW, 2820 RPM, $V_f=190V$, $I_f=0.3 A$, $V_a=160V$, $I_a=7.5 A$. En el cual se ha mantenido las condiciones nominales y constantes en el campo y solo se ha variado los valores de voltaje de armadura. El resultado aparece en las siguientes gráficas.

$V_a (V)$	$I_a (A)$	$w (RPM)$
0	0	0
3	0.12	0
6	0.11	54
10	0.12	163
164	1.2	300
27.8	1.22	588
33	1.414	719
36.5	1.57	790
39.6	1.59	862
43	1.346	950
46	1.62	1014
52	1.539	1178
55.2	1.384	1233
63	1.585	1441
67	1.42	1518
73	1.47	1669
77	1.641	1839
86	1.51	1958
96	1.56	2277
100	1.725	2400
104	1.59	2446
108	1.88	2512
111	1.73	2635
117	1.911	2719
123	1.757	2934

Tabla 3. Valores de medición del motor 3.
Fuente: Elaboración propia.

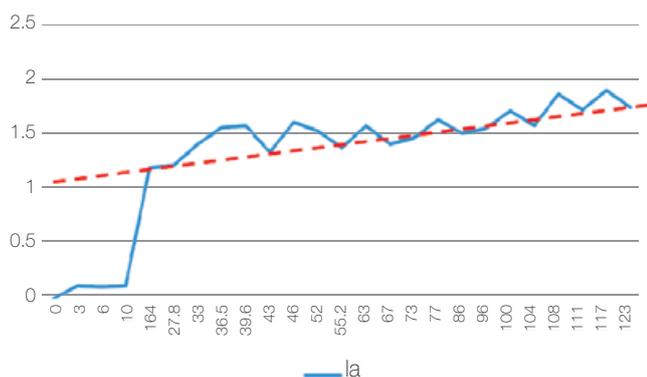


Figura 8. Respuesta I_a Vs V_a en motor DC M3.
Fuente: Elaboración propia.

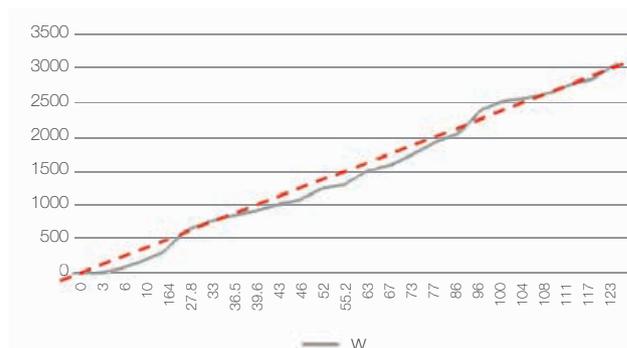


Figura 9. Respuesta w Vs V_a en motor DC M3.
Fuente: Elaboración propia.

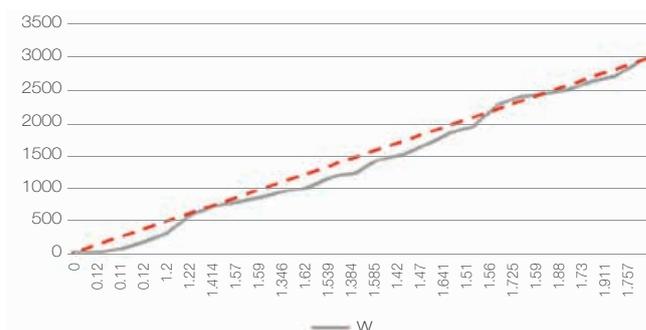


Figura 10. Respuesta w Vs V_a en motor DC M3.
Fuente: Elaboración propia.

Hasta este punto las tendencias en las relaciones de los parámetros de entrada y salida en los tres motores se mantienen y establecen un comportamiento coherente entre ellos. El punto variable está a bajas velocidades.

METODOLOGÍA

Modelamiento fenomenológico del motor DC

Realizaremos un análisis del motor sobre la base de su modelo eléctrico el cual es mostrado en la figura 11.

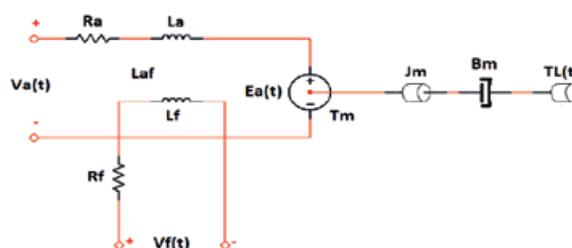


Figura 11. Modelo del motor DC.
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- V_a = Voltaje de armadura, (V)
- V_f = Voltaje de campo, (V)
- R_a, R_f = Resistencia de armadura y campo, (Ω)
- L_a, L_f = Inductancia de armadura y campo, (H)
- L_{af} = Inductancia mutua armadura campo, (H)
- E_a = Voltaje contra electromotriz, (V)
- T_m = Torque entregado por el motor, (N-m)
- B_m = Coeficiente de fricción viscosa, ($kg \cdot m^2/s$)
- T_L = Torque externo aplicado al motor, (N-m)

Las ecuaciones que relacionan estos parámetros son:

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} \quad (1)$$

$$V_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + \frac{L_a^2}{L_{af}} \cdot I_f \cdot \omega \quad (2)$$

$$L_{af} \cdot I_f \cdot I_a = T_L + B \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Considerando al voltaje contraelectromotriz E_a dependiente de las inductancias, la corriente de campo y la velocidad angular podemos escribir la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{L_a^2}{L_{af}} \cdot I_f \cdot \omega \quad (4)$$

Si consideramos L_a , L_{af} , I_f constantes, podemos reemplazar estos factores por una constante K que los represente quedando la ecuación (4) como:

$$E_a = K \cdot \omega \quad (5)$$

Aplicando esto a la ecuación (2) y despejando la con base en la transformada de Laplace:

$$I_a = \frac{V_a - K \cdot \omega}{R_a + s \cdot L_a} \quad (6)$$

Ahora, para el lado de la carga mecánica, tenemos que el torque eléctrico T_e está dado por la expresión:

$$T_e = L_{af} \cdot I_f \cdot I_a \quad (7)$$

Nuevamente, considerando L_{af} e I_f como constantes, podemos introducir una segunda constante K_e quedando la ecuación como:

$$T_e = K_e \cdot I_a \quad (8)$$

Reemplazando las ecuaciones (6) y (8) en la ecuación (3), y aplicando la transformada de Laplace la expresión queda como:

$$K_e \cdot \frac{V_a - K \cdot \omega}{R_a + s \cdot L_a} = T_L + B \cdot \omega + J \cdot s \cdot \omega \quad (9)$$

Tomando las siguientes condiciones relacionadas al motor:

1. No aplicamos carga al motor.
2. L_a y L_{af} son muy próximos en valor, lo cual da como resultado que $K = K_e$.

Encontramos la función de transferencia $H(s) = \omega(s)/V_a(s)$, que relaciona la velocidad angular y el voltaje de armadura.

$$H(s) = \frac{K}{(R_a + s \cdot L_a) \cdot (J \cdot s + B) + K^2} \quad (10)$$

Obtención de parámetros por mediciones experimentales

En esta parte, usaremos valores de medición para caracterizar los parámetros del motor; para ello usaremos al motor M1.

- Medición de R_a y L_a : La medición de los valores la resistencia de armadura la hacemos en forma directa.
- Para medir R_a , usamos un ohmímetro con el cual medimos la resistencia del devanado de armadura, pero moviendo lentamente el rotor y anotando los valores máximos y mínimos, y tomando un promedio.
- Para la medición de la inductancia, usaremos una fuente de voltaje alterno de valor eficaz no mayor a la mitad de la amplitud de V_a de placa del motor. La frecuencia usada es de 1kHz, con ello medimos la corriente la eficaz y aplicamos la ecuación siguiente:

$$L_a = \frac{\sqrt{-R_a^2 + \left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (11)$$

Usando esta ecuación, encontramos $V_{a\text{eficaz}} = 3.18 \text{ V}$ y $I_{a\text{eficaz}} = 83 \text{ mA}$ y con el valor de R_a medido anteriormente nos resulta:

R_a (Ω)	9.47
L_a (H)	0.0059

Tabla 4. Valores de Medición de R_a y L_a .
Fuente: Elaboración propia.

Si consideramos que el motor se encuentra trabajando en estado estable, podemos considerar que la influencia de la parte inductiva es despreciable, por tanto de la ecuación (2) se reduce a la siguiente ecuación:

$$V_a = R_a \cdot I_a + E_a \quad (12)$$

Reemplazando la ecuación (5) en (12), despejando luego la constante K tenemos:

$$K = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\omega} \quad (13)$$

De los datos medidos para el motor M1, pasando ω de RPM a rad/s podemos calcular K como se muestra en la tabla 5.

Va (V)	Ia (A)	w (RPM)	w (rad/s)	K
0	0	0	0.00	0.0000
0.5	0	0	0.00	0.0000
1	0.016	123	12.88	0.0659
1.5	0.0217	290	30.37	0.0426
2	0.0317	568	59.48	0.0286
2.5	0.0417	845	88.49	0.0238
3	0.0483	1038	108.70	0.0234
3.5	0.0563	1271	133.10	0.0223
4	0.0629	1468	153.73	0.0221
4.5	0.071	1705	178.55	0.0214
5	0.0811	2022	211.74	0.0200
5.5	0.087	2225	233.00	0.0201
6	0.0952	2497	261.49	0.0195
6.5	0.1015	2728	285.68	0.0194
7	0.1073	2974	311.44	0.0192
7.5	0.1132	3209	336.05	0.0191
8	0.1204	3502	366.73	0.0187
8.5	0.1267	3749	392.60	0.0186
9	0.1312	3960	414.69	0.0187
9.5	0.137	4243	444.33	0.0185
10	0.1422	4460	467.05	0.0185
10.5	0.1471	4746	497.00	0.0183
11	0.1543	5059	529.78	0.0180
11.5	0.1594	5312	556.27	0.0180
12	0.1622	5532	579.31	0.0181

Tabla 5. Valores de Medición y cálculo de K.
Fuente: Elaboración propia.

Consideraremos el valor de K para la velocidad nominal del motor, por tanto, el valor de K es 0.0191 V/(rad/s).

Es importante definir el valor de la corriente de arranque Iarr, como la corriente necesaria para que el motor venza la inercia mecánica este valor lo tomamos de la tabla 5 como el primer valor en que se inicia el movimiento, el cual es, Iarr= 0.016 A.

Otro parámetro que necesitamos es la constante de tiempo mecánica (tm), la cual se define como el tiempo en el cual el sistema mecánico alcanza el 63.2 % de su velocidad nominal del motor. Para ello usamos un osciloscopio y grabamos la curva de arranque para el motor M1 con un voltaje que permite llegar a su velocidad nominal (para M1 es de 3200 RPM), dicha gráfica se muestra en la figura 12.

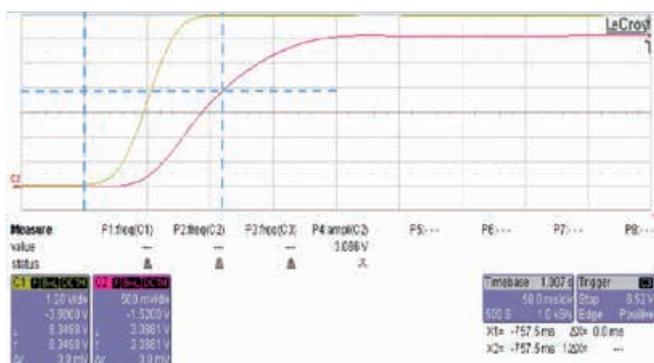


Figura 12. Constante de tiempo mecánica tm.
Fuente: Elaboración propia.

El valor encontrado para tm es de 110ms. Luego definimos el torque de fricción (Tfr) como:

$$T_{fr} = K \cdot I_{arr} \tag{14}$$

Aplicando los datos obtenidos a la ecuación (13) tenemos Tfr=0.3056 N.m.

Ahora, si a la ecuación (3) le consideramos que se aplique antes de iniciar movimiento, la acción de J es nula, encontramos que se puede expresar como:

$$I_a \cdot K = T_{fr} + B \cdot w \tag{15}$$

Despejando B tenemos:

$$B = \frac{(I_a \cdot K - T_{fr})}{w} \tag{16}$$

El valor de B resulta igual a 5.5245e-06 N.m.s

Finalmente, el valor de J lo determinamos con base en la ecuación:

$$J = \frac{t_m \cdot K \cdot K_e}{R_a} \tag{17}$$

Como K=Ke, entonces:

$$J = \frac{t_m \cdot K^2}{R_a} \tag{18}$$

El valor de J al aplicar los valores encontrados resulta de 1.1941e-07 Kg.m².

Los parámetros de motor encontrados son los siguientes:

Ra (Ω)	9.47
La (H)	0.0059
J(Kg.m²)	1.1941e-07
B()	5.5245e-06
K	0.0191

Tabla 6. Valores de parámetros finales.
Fuente: Elaboración propia.

Con estos valores podemos encontrar la función de transferencia usando MATLAB y la ecuación (10).

$$H(s) = \frac{w(s)}{V(s)} = \frac{2.7111e^7}{s^2 + 1.6508e^3 s + 5.9205e^5} \tag{19}$$

La respuesta a una excitación del tipo escalón se muestra a continuación.

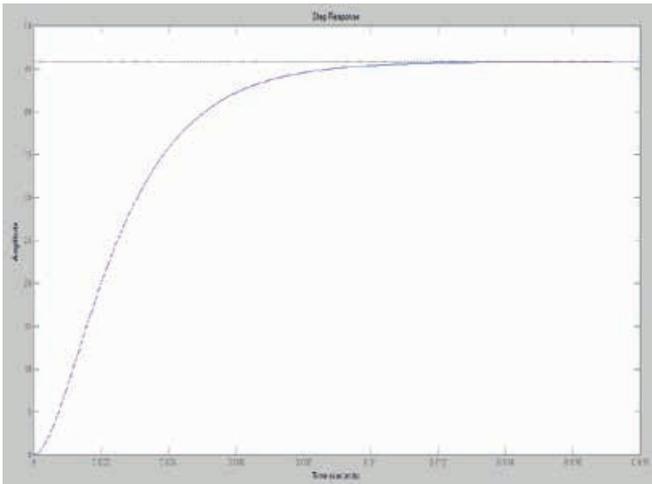


Figura 13. Respuesta de la Ec. (19) a la excitación tipo escalón.
Fuente: Elaboración propia.

La amplitud alcanzada es de 45.8 en estado estable.

Obtención de parámetros del motor usando MATLAB

En esta parte, usaremos el *Toolbox «ident»* de MATLAB, para ello requeriremos tener datos del motor en su respuesta a una excitación del tipo escalón. Esto lo realizaremos con la ayuda de un osciloscopio digital, el cual nos facilitará el proceso de muestreo de la salida que representa a la velocidad en forma de voltaje recogida por un motor como el descrito en por M1, las condiciones de funcionamiento en la toma de datos fueron: $w=2295$ RPM, $V_a=8.57$ y el tiempo de muestreo de 0.0001s. La gráfica de la respuesta se muestra en la figura 14

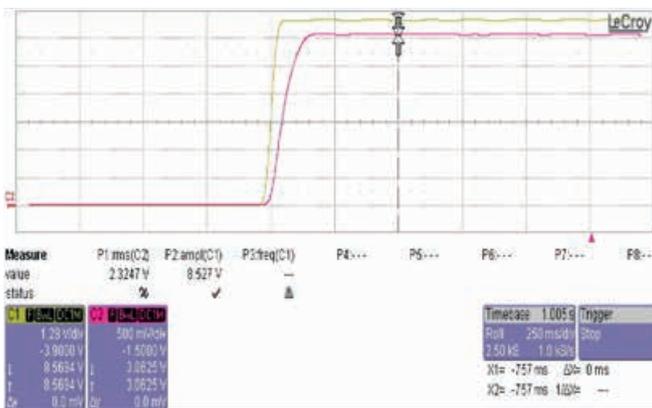


Figura 14. Señales de entrada (V_a) y salida (w) del motor M1.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de convertir voltios a RPMs y de ahí a rad/s; cargamos los datos al *Workspace* de MATLAB y activamos el *Toolbox «ident»*, al cargar la ventana de trabajo cargamos la información de desde el *workspace* al área de datos de entrada en «*mydata*» con la herramienta «*Estimate*» configuramos para la opción «función de transferencia»; consideramos en la función de transferencia un modelo sin ceros en el numerados y con dos polos en el denominador.

La pantalla de datos en el *toolbox ident* lo vemos en la figura 15.

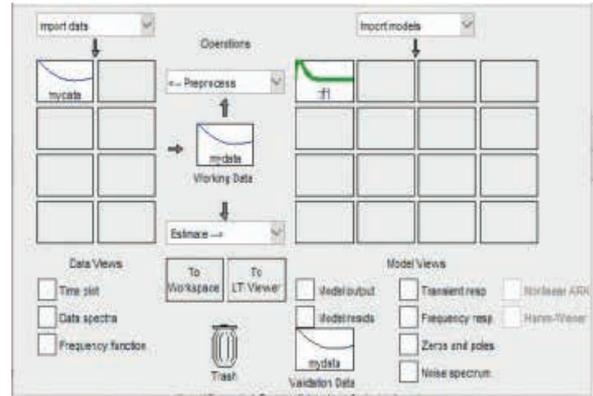


Figura 15. Plantilla de configuración de «*ident*» de MATLAB.
Fuente: Elaboración propia.

La función de transferencia resultante denominada *tf1*, la mostramos en la ecuación (20) y la transferimos al *Workspace* para poder trabajar con ella.

$$H(s) = \frac{4.99e^7}{s^2 + 929.7e^3 s + 1.858e^5} \tag{20}$$

Usando la función «*step*» evaluamos la gráfica de la función de transferencia.

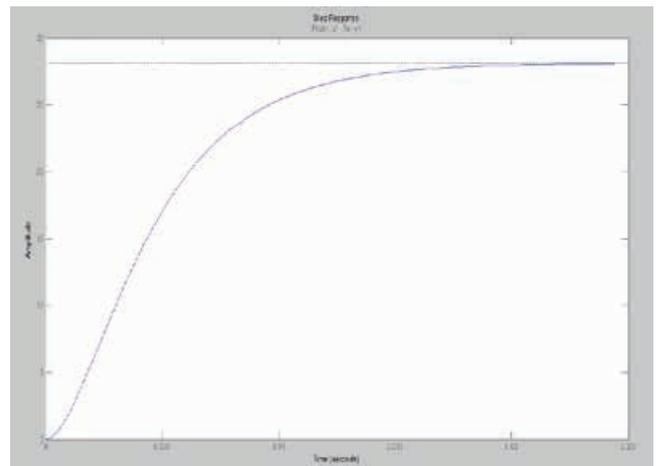


Figura 16. Respuesta a una entrada tipo escalón.
Fuente: Elaboración propia.

La amplitud alcanzada es de 28.1 en estado estable.

RESULTADOS

Comprobación de las funciones de transferencia

Se ha obtenido los parámetros del motor M1 usando métodos experimentales los mostrados en la tabla 6, de dichos valores se calculó la función de transferencia del motor basándonos en la ecuación (10) obteniéndose la ecuación (19). Para poder comparar este resultado y calculamos también la función de transferencia usando el *Toolbox* de «*ident*» de MATLAB y un muestreo de valores de entrada y salida tomados directamente a través de la adquisición de datos realizado con un osciloscopio digital, dando como resultado la función de transferencia de la ecuación (20).

Para comparar las dos funciones de transferencia, escalaremos sus amplitudes a la unidad y usaremos el comando «step» de MATLAB para observar el comportamiento en paralelo de ambas funciones. El resultado se muestra en la figura 17.

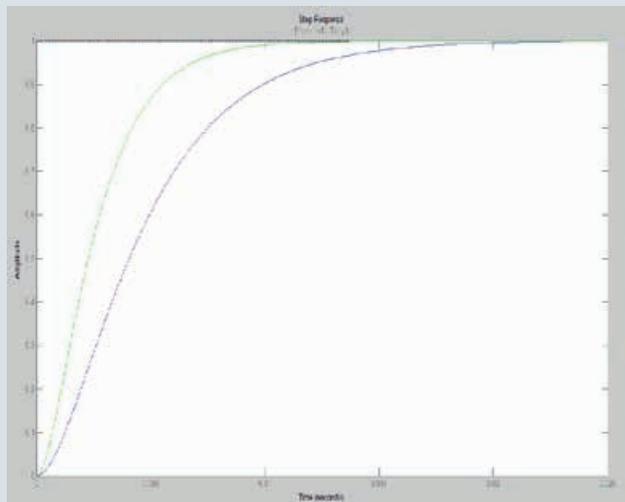


Figura 17. Respuesta de las dos funciones de transferencia.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Al final de este artículo, podemos concluir:

- Como se observa en los valores medidos en la segunda parte en tres motores, dos de imán permanente y uno de estator bobinado, las tendencias de comportamiento de la y y w respecto a V_a ; son similares en los tres. Sin embargo, en el motor de estator bobinado (M3) la inercia del eje fue más evidente por su marcado comportamiento no lineal a bajas velocidades.
- En los motores de estator bobinado, esto es menos perceptible.
- Y, en el caso del motor (M1), la linealidad de la respuesta w Vs V_a es evidente.
- Tomando como objeto de estudio al motor M1 por su mayor linealidad, se realizó el procedimiento de obtención de sus parámetros basándose en valores medidos o experimentales logrando con éxito obtener la función de transferencia del motor en función a ellos.
- Se usó un método alternativo para la obtención de la función de transferencia, basado en el *Toolbox «ident»* de MATLAB.
- Al comparar las dos funciones de transferencia se observó dos grandes diferencias en las respuestas a ser excitados mediante un escalón unitario; la primera es respecto a los tiempos de establecimiento pues en el modelo experimental el tiempo de establecimiento es de 0.0124 s y el modelo no experimental es de 0.0212 casi del doble de lento. Y la segunda, es que el modelo no experimental tiene una tendencia de crecimiento mucho más amortiguado.

- Finalmente, se ha logrado con éxito encontrar las funciones de transferencia y los parámetros del motor mediante datos que pueden ser medidos experimentalmente. Y se ha dado los lineamientos del procedimiento a seguir.

REFERENCIAS

- [1] Ganesh, C., Abhi, B., Anand, V.P., Aranvind, S., Nandhini, R. & Patnaik, S.k. (2012). DC Position Control System -Determination of Parameters and Significance on System Dynamics, *ACEEE International Journal on Electrical and Power Engineering*. 3(1), 1-5.
- [2] Hussin, M. S., Azuwir, M. N., & Zaiazmin, Y. N. (Abril de 2011). Modeling and validation of brushless DC motor. *Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. Conferencia llevada a cabo en IEEE Xplore, Kuala Lumpur, Malasia. 1-4.
- [3] Samitha Ransara, H. K., & Madawala, U. K. (Febrero de 2013). Modelling and analysis of a low cost Brushless DC motor drive. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Conferencia llevada a cabo en IEEE Xplore, Cape Town, South Africa. 356-361.
- [4] Udomsuk, S., Areerak, K.-L., Areerak, K.-N. & Srikaew, A. (Junio de 2010) Parameters identification of separately excited DC motor using adaptive tabu search technique. *International Conference on Advances in Energy Engineering*. Conferencia llevada a cabo en IEEE Xplore, Beijing, China. 48-51
- [5] Yedamale, P. (2003) *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Application Note AN885. Microchip Technology Inc.: Texas. Recuperado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>

ACERCA DEL AUTOR

José Jacob Lazarte Rivera

Recibió el grado de bachiller en Ciencias y el título profesional en Ingeniería Electrónica, por la Universidad Nacional de Ingeniería, ha participado en programas de entrenamiento en Aplicaciones Industriales de la Electrónica en el Instituto Politécnico de Incheon en Corea del Sur. Tiene experiencia en mantenimiento electrónico y desarrollo de soluciones en el campo de la Electrónica Industrial, habiendo realizado diversas actividades de consultoría para empresas locales. Es profesor a tiempo completo en Tecsup sede Centro, dicta cursos relacionados a electrónica analógica y digital, y tiene a su cargo el Laboratorio de Electrónica de Potencia en el departamento de Electricidad y Electrónica. Participa también en el dictado de cursos de especialización para profesionales de la industria, especialmente en temas de Control Electrónico de Potencia y Control Automático de motores eléctricos.

@jlazarte@tecsup.edu.pe

“

MEJORE LA PRODUCTIVIDAD Y RENTABILIDAD DE SU EMPRESA

”

- Servicios de consultoría, investigación y asistencia técnica aplicados a diversos sectores productivos.
- Optimización de procesos.
- Mejora de la gestión y la productividad de la empresa.

Antes de evaluar la mejor opción de financiamiento para comprar un equipo, es necesario determinar el momento óptimo de su reemplazo; este se determina con el cálculo de la vida útil económica, empleando la metodología costo anual equivalente de la inversión y costos de operación y mantenimiento.



Evaluación de activos: de la teoría a la práctica

Assets Evaluation: from Theory to Practice

RESUMEN

La evaluación de activos supera las metodologías que nos plantean los autores de libros de ingeniería económica, evaluación de proyectos, finanzas y matemáticas financieras.

Los ejemplos y casos que encontraremos en los textos referentes a la evaluación de activos tienen como finalidad académica enseñar la metodología de cálculo bajo escenarios muchas veces pocos realistas y con supuestos teóricos, que no se ajustan a lo que ocurre en una empresa.

Por ello, el objetivo de la presente investigación es complementar la evaluación de activos fijos con una financiera que le dé mayores elementos de juicio al evaluador cuando decida adquirir un activo fijo, no solo conociendo el momento óptimo de su reemplazo.

La metodología empleada es la investigación científica descriptiva, con un diseño no transversal experimental, se emplearon técnicas de investigación documental en fuentes bibliográficas, iconográficas y magnéticas, validándose a través del desarrollo de un caso práctico de una empresa de servicios de tornería y fabricación de estructuras metálicas.

A través del caso, se explicará los conceptos básicos y lineamientos que deberá tener en cuenta el evaluador al momento de examinar opciones de reemplazo de equipos, así también como definir la mejor opción de su financiamiento.

El caso propuesto complementa los esquemas actuales de la evaluación de activos, brindando mayor información al evaluador para la toma de decisiones.

ABSTRACT

The evaluation of assets goes beyond the methodologies proposed by the authors of books on economic engineering, project evaluation, finance, and financial mathematics.

The examples and cases that we can find in the books referring to the evaluation of assets, have an academic purpose to teach the methodology of calculation under scenarios that are often few realistic and using theoretical assumptions, which do not fit what occurs in a company.

Therefore, the objective of the present investigation is to complement the evaluation of fixed assets with a financial evaluation, that gives greater elements of judgment to the evaluator when making a decision to acquire a fixed asset, not only knowing the optimal moment for its replacement.

The methodology used is descriptive scientific research, with an experimental non-transversal design, making use of documentary research techniques on bibliographic, iconographic and magnetic sources, validating the research through the development of a practical case in a company of turnery service and manufacture of metal structures.

Through this case, it will be explained the basic concepts and guidelines that the evaluator should take into account when evaluating equipment replacement options, as well as how to define the best financing option.

The proposed case complements the current asset evaluation schemes, providing more information to the evaluator for decision-making procedures.



Palabras clave

Valoración de activo, vida útil económica, costo anual equivalente, costos netos, valor residual, reemplazo de activos.

Key words

Asset valuation, economic useful life, annual equivalent cost, net costs, residual value, replacement of assets.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta el evaluador cuando examina el reemplazo de activos fijos, es determinar la mejor opción de financiamiento de este.

Para realizar una correcta evaluación económica y financiera, se requiere manejar conceptos básicos y fórmulas de matemática financiera, las cuales serán desarrolladas a detalle en la parte de fundamentos.

A partir del caso de una empresa que realiza servicios de tornería y fabricación de estructuras metálicas, se evaluará la mejor opción de financiamiento para el reemplazo de su torno actual.

En el mercado financiero, podemos encontrar diferentes opciones de financiamiento:

- Financiamiento con préstamo
- Financiamiento con arrendamiento operativo
- Financiamiento con arrendamiento financiero
- Financiamiento con bonos

Antes de evaluar la mejor opción de financiamiento para comprar un equipo, es necesario determinar el momento óptimo de su reemplazo.

Este se determina con el cálculo de la vida útil económica, empleando la metodología costo anual equivalente de la inversión y costos de operación y mantenimiento.

La División de Planificación, Estudios e Inversión de Chile recomienda, para la evaluación de reemplazo de equipos, contar con la siguiente información [7]:

- Tipo de equipo y producto que proporciona.
- Descripción del equipo existente, marca y año de adquisición, vida útil técnica y calidad de producción del bien o servicio.
- Descripción del equipo que se pretende adquirir, vida útil técnica y calidad de su producción.
- Volúmenes de producción o de prestación de servicios durante los últimos años, y precios de venta del producto o servicio que se obtiene con el equipo.
- Volúmenes de producción o servicios subcontratados a terceros (si fuera el caso).

Sin embargo, en la realidad, no siempre se contará con toda la información requerida para la evaluación, dado que no todas las empresas llevan un registro y control de sus operaciones de equipos y maquinarias, lo que imposibilita un análisis más fino de la evaluación.

FUNDAMENTOS

Para el desarrollo de la evaluación financiera de activos fijos, se tomó como base de referencia el caso del modelo mínimo costo desarrollado por el Dr. Sergio Bravo Orellana [6]. En este,

se adaptó su metodología a un caso particular de una empresa de servicios de tornería y fabricación de estructuras metálicas.

Para un mejor entendimiento del caso, es necesario que el lector tome referencia de los siguientes conceptos básicos que se desarrollan en los cursos de ingeniería económica, evaluación de proyectos, finanzas y matemáticas financieras.

Activo: Está formado por todos los recursos que son de propiedad de la empresa y que le pueden generar beneficios económicos futuros [1].

Arrendamiento: El arrendamiento o *leasing* es un contrato mediante el cual el dueño de un activo (el arrendador), le confiere a otra persona (el arrendatario) el derecho de usar el activo por un periodo de tiempo determinado, a cambio de un pago monetario que se efectúa a manera de alquiler [2].

El arrendamiento operativo: Las Normas Internacionales de Contabilidad (NIC) definen el arrendamiento operativo como un tipo de contrato de arrendamiento que no trasfiere todos los riesgos y ventajas inherentes al derecho de propiedad (Dirección Nacional Pública S. F.) [2].

El arrendamiento financiero: Las NIC que son aceptadas por Perú, afirman que «Un arrendamiento se clasificará como financiero cuando transfiera sustancialmente todos los riesgos y ventajas inherentes a la propiedad». Esto se hace evidente en su carácter no cancelable, ya que transfiere hacia el arrendatario los riesgos de que el activo quede obsoleto. Además, es común que, al terminar el periodo de arrendamiento, el activo sea entregado o vendido al arrendatario por una suma menor al valor del rescate [2].

Costo anual equivalente uniforme (CAUE): Método utilizado corrientemente para la comparación de dos alternativas. El CAUE significa que todos los ingresos y desembolsos (irregulares o uniformes) deben convertirse en una cantidad anual uniforme equivalente. La principal ventaja de este método sobre los otros es que no requiere que la comparación se lleve a cabo sobre el mínimo común múltiplo de años cuando las alternativas tienen diferentes vidas útiles [3].

Obsolescencia: Como consecuencia de la competencia internacional y del rápido avance tecnológico, los sistemas y activos actuales instalados funcionan aceptablemente, aunque con menor productividad que el equipo que se fabricará en breve. La disminución del tiempo que tardan los productos en llegar al mercado, con frecuencia, es la razón de los análisis de reemplazo anticipado, es decir, estudios realizados antes de que se alcance la vida útil económica calculada [4].

Vida útil económica: Periodo durante el cual una máquina puede operar en forma eficiente realizando un trabajo económico, satisfactorio y oportuno, siempre y cuando sea correctamente conservada y mantenida [6].

Costos netos: El método de los costos netos es para evaluar un proyecto nuevo, en una empresa en marcha. Sobre todo, cuando se trata de decidir entre arrendar o comprar con deuda: préstamo o bonos [8].

Costo de oportunidad del capital (COK): Es aquella tasa de rendimiento resultante de una alternativa especulativa de igual riesgo [9].

Depreciación: Es la distribución sistemática del importe depreciable de un activo a lo largo de su vida útil [11].

Tasa efectiva anual (TEA): La tasa efectiva anual indica el porcentaje efectivamente ganado durante un año y se capitaliza una sola vez [15].

Valor de desecho contable: El valor contable o valor libro corresponde al valor de adquisición de cada activo menos la depreciación que tenga acumulada a la fecha de su cálculo o, lo que es lo mismo, a lo que falta por depreciar ese activo en el término del horizonte de evaluación [12].

Valor de desecho comercial: La valoración por el método comercial se fundamenta en que los valores contables no reflejan el verdadero valor que podrán tener los activos al término del periodo de evaluación [12].

Valor de desecho económico: La valoración por el método económico considera que el proyecto tendrá un valor equivalente a lo que será capaz de generar a futuro [12].

Valor presente de los costos (VPC): Representa los costos actualizado a una tasa de descuento [8].

Valor residual: También conocido como «valor de desecho»; en términos generales, es el valor que se le asigna al activo al finalizar su periodo de depreciación, independientemente de su vida útil real. Se usa contablemente para determinar,

por diferencia, la pérdida de valor durante la vida contable del activo [12].

Valuación de activos: Método que consiste en la determinación del precio del mercado de cada activo, entendiéndose por este al monto que se pueda obtener en efectivo en una transacción libre ejecutada inmediatamente y en las condiciones presentes del activo, su estado y capacidad de uso, como del entorno y posibles demandantes [10].

Vida técnica: Referida, generalmente, a los equipos industriales. Se denomina vida técnica o vida útil de una máquina al número de años que se estima que la misma podrá funcionar normalmente. Por tratarse de una estimación que se formula *ex ante* o *a priori*, la vida técnica de un equipo industrial nunca podrá conocerse con exactitud. Tomando como base la experiencia y las características técnicas siempre se podrá formar una idea, aproximada al menos, de cuál va a ser (salvo imprevistos) la duración de un equipo industrial. La vida técnica no siempre coincide con la vida económica. Esta se puede alargar, aumentando los gastos de conservación y reparación, o acortar, según convenga [14].

Caso estudio: Maquinsa S. A. C.

Maquinsa S. A. C. es una empresa que se dedica a servicios de tornería y construcción de estructuras metálicas. Inicia sus actividades a comienzos del 2013, para lo cual adquiere un torno modelo STH 400 valorado en S/ 105 000.



Figura 1. Modelo de torno STH 400.
Fuente: Empresa fabricante de tornos Pinacho.

MODELO	STH 400	
ESPECIFICACIONES	MM	PULGADAS
X - Husillo bolas, Ø y paso (mm)	32/5	
Contrapunto, Ø caña	96	4"
Recorrido de la caña contrapunto	215	9"
Cono morse caña (MT)	6	
Posiciones torreta automática estándar	8	
Dimensiones de la herramienta	32x32	1 ¼x1 ¼"
Ø Herramienta interiores	50	2"
Precisión (mm)	0.01	
Repetitividad (mm)	0.01	
Lunetas fijas, capacidades	10-300/300-530	1½-12 / 12-21"
Luneta móvil, capacidad	70-290	3-11 ½"
Potencia motor principal (kW)	17	
Potencia bomba refrigerante (kW)	0.57	
Caudal bomba de refrigerante (l/min)	50	
Capacidad tanque refrigerante (l)	130/180/225/300/350	
Dimensiones	Longitud (mm)	3557/4557/5557/6557/7557
	Anchura (mm)	2077
	Altura (mm)	2227
	Peso (kg)	5460/5760/6460/7560/9060
Norma de verificación	DIN 8605	

Tabla 1. Especificaciones técnicas de torno STH 400.
Fuente: Empresa fabricante de tornos Pinacho.

De acuerdo con los registros de la empresa se tienen los siguientes costos históricos de operación y mantenimiento (2013-2017) y su valor residual del torno STH 400.

Concepto	2013	2014	2015	2016	2017
Valor residual Torno STH 400	76 280.00	60 180.00	48 410.00	39 590.00	32 820.00

Tabla 2. Valor residual histórico Torno STH 400.
Fuente: Maquinsa S. A. C.

Costos	2013	2014	2015	2016	2017
Costo de operación	12 000.00	12 900.00	13 860.00	14 900.00	16 020.00
Costo de mantenimiento	10 000.00	10 800.00	11 660.00	12 600.00	13 600.00
CO&M	22 000.00	23 700.00	25 520.00	27 500.00	29 620.00

Tabla 3. Costos históricos de operación y mantenimiento.
Fuente: Maquinsa S. A. C.

El Departamento de Comercial proyecta un crecimiento en la demanda de servicios de torneado para los siguientes años de un 20 %, dado los nuevos proyectos mineros que tiene en cartera el actual gobierno.

Por su parte, el Departamento de Producción estima los costos de operación y mantenimiento de su máquina para los siguientes cuatro años (2018-2022) y su valor residual.

Concepto	2018	2019	2020	2021	2022
Valor residual de máquina	27 540.00	23 340.00	19 960.00	17 200.00	14 930.00

Tabla 4. Valor residual proyectado de torno STH 400 Proyectado.
Fuente: Maquinsa S. A. C.

Costos	2018	2019	2020	2021	2022
Costo de operación	19 120.00	22 820.00	27 220.00	32 480.00	38 740.00
Costo de mantenimiento	16 420.00	19 800.00	23 880.00	28 820.00	34 760.00
CO&M	35 540.00	42 620.00	51 100.00	61 300.00	73 500.00

Tabla 5. Costos de operación y mantenimiento proyectados.
Fuente: Maquinsa S. A. C.

Debido al incremento gradual proyectado de los costos de operación y mantenimiento de la máquina, el gerente de Producción decidió evaluar la conveniencia o no de comprar un nuevo torno para reemplazar el actual (Torno STH 400).

La racionalidad económica aconseja mantener los costos en el menor nivel posible, independientemente del nivel de ingresos por ventas [5].

METODOLOGÍA

La metodología empleada en la presente investigación es de tipo descriptiva, que consiste en examinar un tema o un problema poco estudiado y del que se tiene dudas o que no haya sido abordado anteriormente [13].

El desarrollo de un caso práctico permitirá graficar de manera sencilla la evaluación de reemplazo de activos fijos. Asimismo, se complementa con la evaluación de la mejor opción de financiamiento del equipo, siendo este acápite el aporte de la investigación, complementando los casos existentes en los libros de evaluación de activos.

Para el desarrollo del caso, se conceptualizan los conceptos básicos de evaluación de activos, adicionando a ello el uso de las principales formulas financieras para el cálculo del costo anual equivalente uniforme y costos netos [8].

A continuación, se desarrollará paso a paso la solución del caso planteado.

Paso 1

Para un mejor entendimiento, separaremos el flujo de inversiones del flujo de costos de operación y mantenimiento, para luego sumar ambos flujos o costos anuales equivalentes, a fin de que podamos determinar la vida útil económica de la máquina. Se utiliza un costo de oportunidad del 20 % anual.

- I** : Inversión
- CO** : Costo de operación
- CM** : Costo de mantenimiento
- CT** : Costo total

CT = CO + CM

Paso 2

Calculamos el costo anual equivalente de la inversión con una proyección de 10 años que equivale a la vida útil técnica del torno.

VR1 = S/ 76 280 VR3 = S/ 60 180 VR3 = S/ 14 930

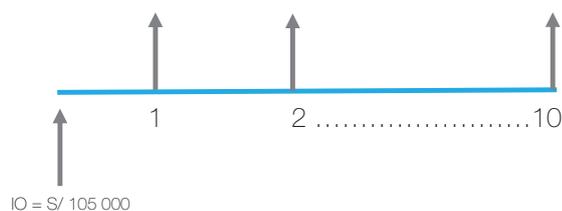


Figura 2. Valor residual proyectado (Torno STH 400).
Fuente: Información de la empresa.

*VR = Valor residual

2.1. Actualización del VR en año 1

$S/ 76\ 280.00 / (1 + 20\%)^1 = S/ 63\ 566.67$

2.2. Valor actual de inversión en año 1

$S/ -105\ 000.00 + S/ 63\ 566.67$
 $= S/ -41\ 433.33$

2.3. Actualización de inversión en año 1

$= S/ -41\ 433.33 (1 + 20\%)^1$
 $= S/ -49\ 720.00$

Para el segundo año, de igual forma, se actualiza el valor residual de la maquina (VR2), descontándose de su valor inicial, para, posteriormente, calcular el costo anual equivalente de la inversión a una política de reemplazo dos años.

2.4. Actualización del VR año 2

$S/ 60\ 180.00 / (1 + 20\%)^2 = S/ 41\ 791.67$

2.5. Valor actual de inversión en año 2

$S/ -105\ 000.00 + S/ 41\ 791.67$
 $= S/ -63\ 208.33$

2.6. Actualización de inversión en año 2

$R = P \cdot FDVP_{i, n}$

$FDVP = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

$R = S/ -63\ 208.33 \times \frac{20\%(1+20\%)^2}{(1+20\%)^2 - 1}$

$R = S/ 41\ 372.73$

Hasta este punto, podemos concluir que una política de reemplazo cada dos años (S/ 41 372.73) es menor que el correspondiente a una política de reemplazo a cada año (S/ 49 720.00)

*Para el cálculo de los resultados anteriores hacemos uso de las siguientes fórmulas de matemática financiera [11].

Factor de capitalización (FC)

$FA = 1 / (1+i)^n$

$S = P \cdot FC_{n, i}$

Factor de actualización (FA)

$FA = 1 / (1+i)^n$

$P = S \cdot FA_{n, i}$

Factor de distribución de un valor presente (FDVP)

$FDVP = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

$R = S \cdot FDVP_{n, i}$

Seguidamente, haciendo uso del programa Excel encontramos el valor actualizado de las inversiones para los siguientes años, hasta el periodo 10.

Periodo	Año	Inversión	Valor residual	FA (VR)	VP (VR)	FDVP (VR)
0	2012	105 000.00				
1	2013		76 280.00	63 566.67	-41 433.33	-49 720.00
2	2014		60 180.00	41 791.67	-63 208.33	-41 372.73
3	2015		48 410.00	28 015.05	-76 984.95	-36 546.70
4	2016		39 590.00	19 092.00	-85 907.60	-33 185.17
5	2017		32 820.00	13 189.62	-91 810.38	-30 699.53
6	2018		27 540.00	9 223.09	-95 776.91	-28 800.67
7	2019		23 340.00	6 513.77	-98 486.23	-27 322.44
8	2020		19 960.00	4 642.06	-100 357.94	-26 154.23
9	2021		17 200.00	3 333.48	-101 666.52	-25 221.38
10	2022		14 930.00	2 411.28	-102 588.72	-24 496.74

Tabla 6. Proyección de costo anual equivalente de inversiones.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 3

Luego de calcular el costo anual equivalente de las inversiones, procedemos a estimar el costo anual equivalente para el costo de operación y mantenimiento del torno.

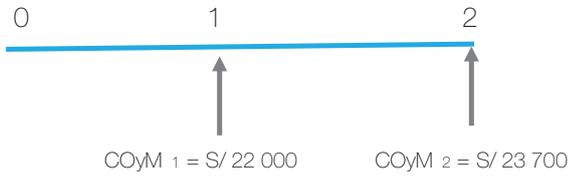


Figura 3. Costos de operación y mantenimiento (Torno STH 400).
Fuente: Información de la empresa.

3.1. Actualización del COyM en año 1

$$S/ 22 000.00 / (1 + 20 \%) ^ 1 = S/ 18 333.33$$

3.2. Actualización CoyM en año 1

$$= S/ 18 333.33 (1 + 20 \%) ^ 1$$

$$= S/ - 22 000.00$$

3.3. Actualización del COyM en año 2

Para el segundo año, se actualiza el costo de operación y el costo de mantenimiento del segundo año a la tasa del 20 % anual y le sumamos la actualización del costo de operación y mantenimiento del primer año.

$$[S/ 22 000.00 / (1 + 20 \%) ^ 1] + [S/ 23 700.00 / (1 + 20 \%) ^ 2]$$

$$= S/ 34 791.67$$

3.4. Actualización CoyM en año 2

Una vez actualizado el costo de operación y mantenimiento al año 1, procedemos calcular el costo anual equivalente de los costos de operación y mantenimiento para una política de reemplazo de cada 2 años.

$$R = P \cdot FDVP_{i, n}$$

$$R = S/ - 34 791.67 \times 20 \%(1+20 \%)^2 / (1+20 \%)^2 - 1$$

$$R = S/ 22 772.73$$

Periodo	Año	Inversión	CO&M	FA CO&M	FDVP (VR)
0	2012	105 000.00			
1	2013		22 000.00	18 333.33	22 000.00
2	2014		23 700.00	34 791.67	22 772.73
3	2015		25 520.00	49 560.19	23 527.47
4	2016		27 500.00	62 822.15	24 267.51
5	2017		29 620.00	74 725.76	24 986.78
6	2018		35 540.00	86 628.03	26 049.55
7	2019		42 620.00	98 522.49	27 332.50
8	2020		51 199.00	110 406.72	28 773.03
9	2021		61 300.00	122 287.07	30 336.91
10	2022		73 500.00	134 157.73	31 999.67

Tabla 7. Proyección costo anual equivalentes de operación y mantenimiento.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 4

Finalmente, procedemos a calcular el costo anual equivalente total, sumando el costo anual equivalente de las inversiones más los costos anuales operativos y de mantenimiento del torno STH 400.

Periodo	Año	CAET
0	2012	
1	2013	-71 720.00
2	2014	-64 145.45
3	2015	-60 074.18
4	2016	-57 452.68
5	2017	-55 686.30
6	2018	-54 850.21
7	2019	-54 654.933
8	2020	-54 927.26
9	2021	-55 558.29
10	2022	-56 469.42

Tabla 8. Proyección del costo anual equivalente.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8, se aprecia que costo anual equivalente total mínimo se produce durante el año 8, que es cuando se debe reemplazar el torno STH 400; de lo contrario, su permanencia en la empresa ya no es beneficiosa. Por lo tanto, este activo tiene una vida útil económica de siete años.

Flujos relevantes	0	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Inversión	105 000.00										
Valor residual		76 280.00	60 180.00	48 410.00	39 590.00	32 820.00	2 854.00	2 434.00	2 096.00	1 820.00	1 593.00
CAE inversión		49 720.00	41 372.73	36 546.70	33 185.17	30 699.53	28 800.67	27 322.44	26 154.23	25 221.38	24 469.74
Costo de operación		1 200.00	1 290.00	1 386.00	1 490.00	1 602.00	1 912.00	2 282.00	2 722.00	3 248.00	3 874.00
Costo de mantenimiento		1 000.00	1 080.00	1 166.00	1 260.00	1 360.00	1 642.00	1 980.00	2 388.00	2 882.00	3 476.00
CO y M		2 200.00	2 370.00	2 552.00	2 750.00	2 962.00	3 554.00	4 262.00	5 110.00	6 130.00	7 350.00
Actualización del CO y M		18 333.33	34 791.67	49 560.19	62 822.15	74 725.76	86 628.03	98 522.49	110 406.72	122 287.07	134 157.73
CAE CO y M		22 000.00	22 772.73	23 527.47	24 267.51	24 986.78	26 049.55	27 332.50	28 773.03	30 336.91	31 999.67
Costo de oportunidad	20 %										
CAE Total		71 720.00	64 145.45	60 074.18	57 452.68	55 686.30	54 850.21	54 654.93	54 927.26	55 558.29	56 469.42

Tabla 9. Vida útil económica de Torno STH 400.
Fuente: Elaboración propia.

La vida útil económica del torno STH 400 se da en el periodo 8, que, para nuestro caso, corresponde al 2018.

Paso 5

Luego de determinar el momento óptimo de reemplazo del torno STH 400 dado el cálculo de estimación de su vida útil económica (año 8), el gerente de Producción decide comprar un torno de mayor recorrido, capacidad de torneado, potencia y volteo sobre bancada, eligiendo el modelo STH 500, que tiene un valor de mercado de S/ 120 000.00 con una vida útil técnica de 10 años.

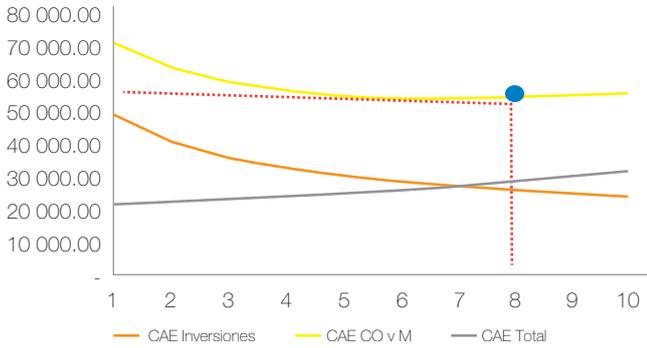


Figura 4. Proyección costos equivalentes anuales de torno STH 400.
Fuente: Elaboración propia.

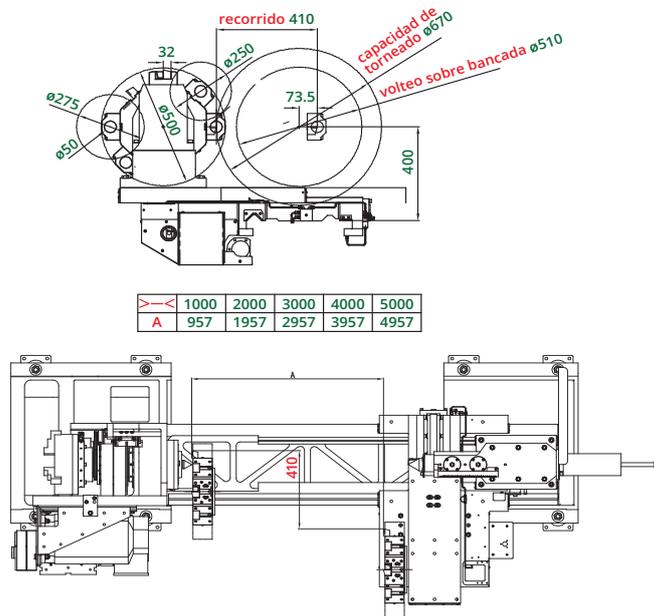


Figura 5. Diagrama de interferencias de STH 400.
Fuente: Empresa fabricante de tornos Pinacho.

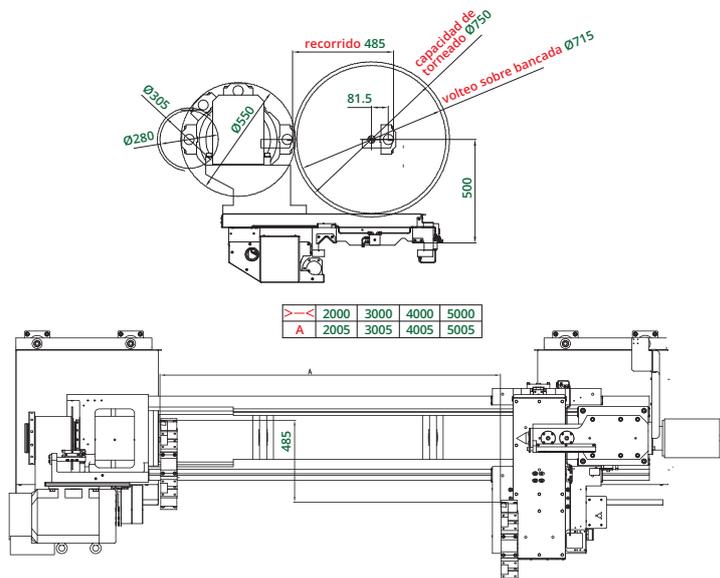


Figura 6. Diagrama de interferencias de STH 500.
Fuente: Empresa fabricante de tornos Pinacho.

MODELO	STH 400				STH 500										
	ESPECIFICACIONES		MM	PULGADAS	MM	PULGADAS									
Control	Fanuc 0i-TF / Fagor 8055i/FL-TC / Siemens 828D														
Distancia entre centros	1000/2000/ 3000/4000/5000		40°/80°/120°/ 157°/197°		2000/3000/ 4000/5000		80°/120°/ 157°/197°								
Altura de centro	400		16"		500		20"								
Max. Ø sobre bancada	805		32"		1010		40"								
Max. Ø sobre carro	720		28"		935		37"								
Max. Ø sobre carro transversal	515		20"		718		28"								
Recorrido carro transversal	400		16"		500		20"								
Longitud del carro	900		35"		980		38 ½"								
Longitud del carro transversal	750		30"		950		37"								
Ancho de bancada	425		17"		500		20"								
Agujero del eje principal del cabezal	105	155	230	4"	6"	9"	130	155	230	310	5"	6"	9"	12"	
Nariz del eje principal (ASA/CAM-LOCK)	A2-8/D1-8		A2-11/--		A2-15/--		A2-11/--		A2-11/--		A2-15/--		A2-20/--		
Cono Morse eje principal (MT)	5		5		6		5		5		6		6		
Rangos de velocidad (rpm)	Rango I	0-425		0-356		0-268		0-366		0-356		0-300		0-194	
	Rango II	425-1700		356-1000		268-750		366-1400		356-1000		300-750		194-560	
Avances de trabajo Z,X (mm/min)			0-7000				0-7000								
Avances rápidos Z (m/min)			10				10								
Avances rápidos X (m/min)			10				10								
Z - Husillo bolas, Ø y paso (mm)			50/10				50/10								

Tabla 10. Cuadro comparativo: especificaciones técnicas entre modelos de torno STH 400 y STH 500.

Fuente: Empresa fabricante de tornos Pinacho.

Para determinar la modalidad más conveniente de financiamiento, aplicaremos el método de evaluación por costos netos.

Evaluación por costos netos

Se procederá a evaluar la menor opción de financiamiento:

Opción 1: Financiamiento con préstamo bancario

Condiciones del préstamo

Préstamo : S/ 120 000.00
TEA : 10.50 %
Período : 5 años

*TEA (Tasa efectiva anual)

Calculo de valor de cuota

$$R = 120\,000.00 \times FDVP\ 5,0,105$$

$$R = 120\,000.00 \times 10.50\% \frac{(1+10.50\%)^5}{(1+10.50\%)^5 - 1}$$

$$R = S/ 32\,061.06$$

Periodo	Saldo	Interés	Amortización	Cuota
1	120 000.00	12 600.00	19 461.06	32 061.06
2	100 538.94	10 556.59	21 504.47	32 061.06
3	79 034.47	8 298.62	23 762.44	32 061.06
4	55 272.03	5 803.56	26 257.50	32 061.06
5	29 014.53	3 046.53	29 014.53	32 061.06

Tabla 11. Cuadro servicio de la deuda.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, procedemos a elaborar el flujo de pago después de impuestos, teniendo en cuenta que el impuesto a la renta en el Perú es de 29.50 % anual.

Consideramos la siguiente simbología para el cálculo del flujo de pagos:

- C = Cuota
- I = Interés
- AM = Amortización
- D = Depreciación
- T = Impuesto a renta
- DT = Después de impuestos

Años	Cuota C (I+AM)	Depreciación C	Interés I	Monto econ. imp. (D+I)	Monto econ. imp. T (D+I)	Flujo DT (I+AM) – T(D+i)
1	32 061.06	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	21 264.06
2	32 061.06	24 000.00	10 556.59	34 556.59	10 194.19	21 866.87
3	32 061.06	24 000.00	8 298.62	32 298.62	9 528.09	22 532.97
4	32 061.06	24 000.00	5 803.56	29 803.56	8 792.05	23 269.01
5	32 061.06	24 000.00	3 046.53	27 046.53	7 978.73	24 082.33
		120 000.00	40 305.30			

Tabla 12. Flujo de pago después de impuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, calculamos el valor presente de los costos (VPC) =

$$21\,264.06/(1+10.50\%)^1 + 21\,866.87/(1+10.50\%)^2 + 22\,532.97/(1+10.50\%)^3 + 23\,269.01/(1+10.50\%)^4 + 24\,082.33/(1+10.50\%)^5$$

VPC con préstamo = **S/ 66 844.99**

Opción 2: Financiamiento con arriendo operativo

Se considera un pago por arrendamiento de S/ 35 827.20.

Años	Pagos arriendo A	Economía de impuesto T.A	FP D. imp. A-T.A
1	35 827.20	10 569.02	25 258.18
2	35 827.20	10 569.02	25 258.18
3	35 827.20	10 569.02	25 258.18
4	35 827.20	10 569.02	25 258.18
5	35 827.20	10 569.02	25 258.18

Tabla 13. Cuadro de pago de arriendo después de impuestos.
Fuente: Elaboración propia.

*F. P. D. Imp. = Flujo de pagos después de impuestos

Elaborado el cuadro de pago de arriendo, procedemos a calcular el VPC con arrendamiento.

$$25\,258.18/(1+10.50\%)^1 + 25\,258.18/(1+10.50\%)^2 + 25\,258.18/(1+10.50\%)^3 + 25\,258.18/(1+10.50\%)^4 + 25\,258.18/(1+10.50\%)^5$$

VPC con arriendo operativo = **S/ 75 537.41**

Opción 3: Financiamiento con arriendo financiero

Se considera un pago de arriendo al banco por S/ 49 712.00

Años	Pagos arriendo A	Economía de impuesto T.A	FP D. imp. A-T.A
1	49 712.00	14 665.04	35 046.96
2	49 712.00	14 665.04	35 046.96
3	49 712.00	14 665.04	35 046.96
4		-	-
5		-	-

Tabla 14. Cuadro de pago de arriendo financiero después de impuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Calculamos el VPC con arriendo financiero

$$35\,046.96/(1+10.50\%)^1 + 35\,046.96/(1+10.50\%)^2 + 35\,046.96/(1+10.50\%)^3$$

VPC con arriendo financiero = **S/ 73 825.77**

Opción 4: Financiamiento con bonos

Consideramos una cuota de intereses de S/ 12 600.00. Capital S/ 120 000.00 al final.

Años	Cuota C (I+AM)	Depreciación D	Interés I	Monto econ. imp. (D+I)	Monto econ. imp. T(D+I)	Flujo DT (I+AM) – T(D+i)
1	12 600.00	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	1 803.00
2	12 600.00	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	1 803.00
3	12 600.00	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	1 803.00
4	12 600.00	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	1 803.00
5	132 600.00	24 000.00	12 600.00	36 600.00	10 797.00	121 803.00
	120 000.00					

Tabla 15. Cuadro de pago con bonos después de impuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Calculamos el VPC con bonos:

$$1\,803.00/(1+10.50\%)^1 + 1\,803.00/(1+10.50\%)^2 + 1\,803.00/(1+10.50\%)^3 + 1\,803.00/(1+10.50\%)^4 + 121\,803.00/(1+10.50\%)^5$$

VPC con bonos = **S/ 53 617.38**

Luego de evaluar diferentes opciones de financiamiento:

VPC con arrendamiento operativo	S/ 75 537.41
VPC con arrendamiento financiero	S/ 73 825.77
VPC con préstamo	S/ 66 844.99
VPC con bonos	S/ 53 617.38

Tabla 16. Comparación de opciones de financiamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Concluimos que la opción de financiamiento con bonos es de menor costo, por lo cual se recomienda financiar la compra del torno STH 500, emitiendo bonos por un valor nominal de S/ 120 000 con plazo de 5 años. Cada bono devengará un interés del 10 % nominal anual pagadero anualmente. La redención se efectuará el 31 de diciembre de 2022.

Maquinsa S. A. C. tiene que pagar a un intermediario financiero (bancos o sociedad de agentes de bolsa), el costo de la colocación de bonos en el mercado.

El mercado de valores es el gran competidor de la banca, pues la tasa de cupón del bono es más baja que la de un préstamo.

RESULTADOS

El desarrollo del caso práctico: Maquinsa S. A. C. permitirá al lector comprender, de una manera sencilla, la metodología para evaluar la mejor opción de financiamiento para la compra de un activo.

Los conceptos básicos en finanzas y las fórmulas de matemática financiera expuestas en este artículo refuerzan enormemente la comprensión de las metodologías: vida útil económica, costo anual equivalente de las inversiones, costo anual equivalente de los costos de operación y mantenimiento, y la evaluación de costos netos.

Se demuestra, en una forma clara, que el financiamiento del torno STH 500 a través de bonos es la opción de financiamiento menos costosa, dado que la empresa establece la tasa nominal anual pagadera del bono.

La vida útil económica del torno STH 400 se cumple en el año 2018. A partir de este año, si continuamos trabajando con el mismo equipo, generaremos pérdidas económicas a la empresa, dado que se incurrirían en mayores costos de operación y mantenimiento del equipo en los siguientes años.

CONCLUSIONES

- La metodología de la evaluación de los costos netos es útil para evaluar opciones de financiamiento. No se requiere tener datos de ventas, dado que este método es empleado para evaluar proyectos nuevos, en empresas en marcha. En nuestro caso, la adquisición de un activo fijo.
- La decisión de seguir trabajando o no con un equipo depende de la vida útil económica y no de la vida técnica.
- La opción de financiamiento con bonos es la de menor costo, dado que la empresa determina la tasa nominal anual.

REFERENCIAS

[1] Beltrán, A., y Cueva, H. (2009). *Evaluación privada de proyectos* (2ª ed.). Lima: Pearson.

[2] Beltrán, A., y Cueva, H. (2013). *Evaluación privada de proyectos* (3ª ed.). Lima: Universidad del Pacífico.

[3] Blank, L., y Tarquin, A. (1991). *Ingeniería Económica* (3ª ed.). Bogotá: Mc Graw Hill.

[4] Blank, L., y Tarquin, A. (2012). *Ingeniería Económica* (7ª ed.). México D. F.: Mc Graw Hill.

[5] Bravo, S. (2006). *La vida útil de un activo y política de reemplazo de activos*. Lima: ESAN.

[6] Cantillo, V. (1998). Reemplazo económico de los equipos. *Ingeniería & desarrollo*. 3(4), 58-63.

[7] Chile, Ministerio de Planificación (2005). *Metodología de preparación y evaluación de proyectos de reemplazo de equipos*. Recuperado de <https://bit.ly/2NKmwtP>

[8] Espinoza, A. (2008). *Evaluación de proyectos: Inversiones reales y financieras*. Lima: ESAN.

[9] Kafka, F. (1995). *Evaluación estratégica de proyectos de inversión* (2ª ed.). Lima: Universidad del Pacífico.

[10] Perú, Ministerio de Economía y Finanzas (2012). Directiva N.º 001-2012. Proinversión. Aplicación de metodologías de valuación de activos, empresas y proyectos.

[11] Perú, Ministerio de Economía y Finanzas (2012). Normas Internacionales de Contabilidad Oficializadas. NIC 16: Propiedades, Planta y Equipo.

[12] Sapag, N. (2011). *Proyectos de inversión: Formulación y evaluación* (2ª ed.). Santiago de Chile: Pearson.

[13] Sampiere, H. (2014). *Metodología de la investigación*. México D. F.: Mc Graw Hill.

[14] www.economía48.com (2006-2009). *La gran enciclopedia de economía*. Vida técnica. Recuperado de <http://www.economía48.com/>

[15] Zavala, C. (1995). *Matemáticas financieras*. Arequipa: UCSM.

ACERCA DEL AUTOR

José Eduardo Rojas Gómez

Asesor y consultor de proyectos de inversión pública y privada, con más de 15 años de experiencia en la formulación y evaluación de proyectos públicos y privados. Exconsultor del Banco de Proyectos de la Región Arequipa. Economista por la Universidad Católica Santa María. Magíster en Ingeniería Industrial con mención en Gestión de la Producción por la Universidad Nacional de San Agustín. Conferencista en congresos internacionales y nacionales en proyectos de inversión. Miembro del *Project Management Institute (PMI)®*, Member ID: 3100459. Actualmente, se desempeña como *planner* en el Departamento de Estudios Generales de Tecsup.

@ jrojas@tecsup.edu.pe

FAB ACADEMY

2019

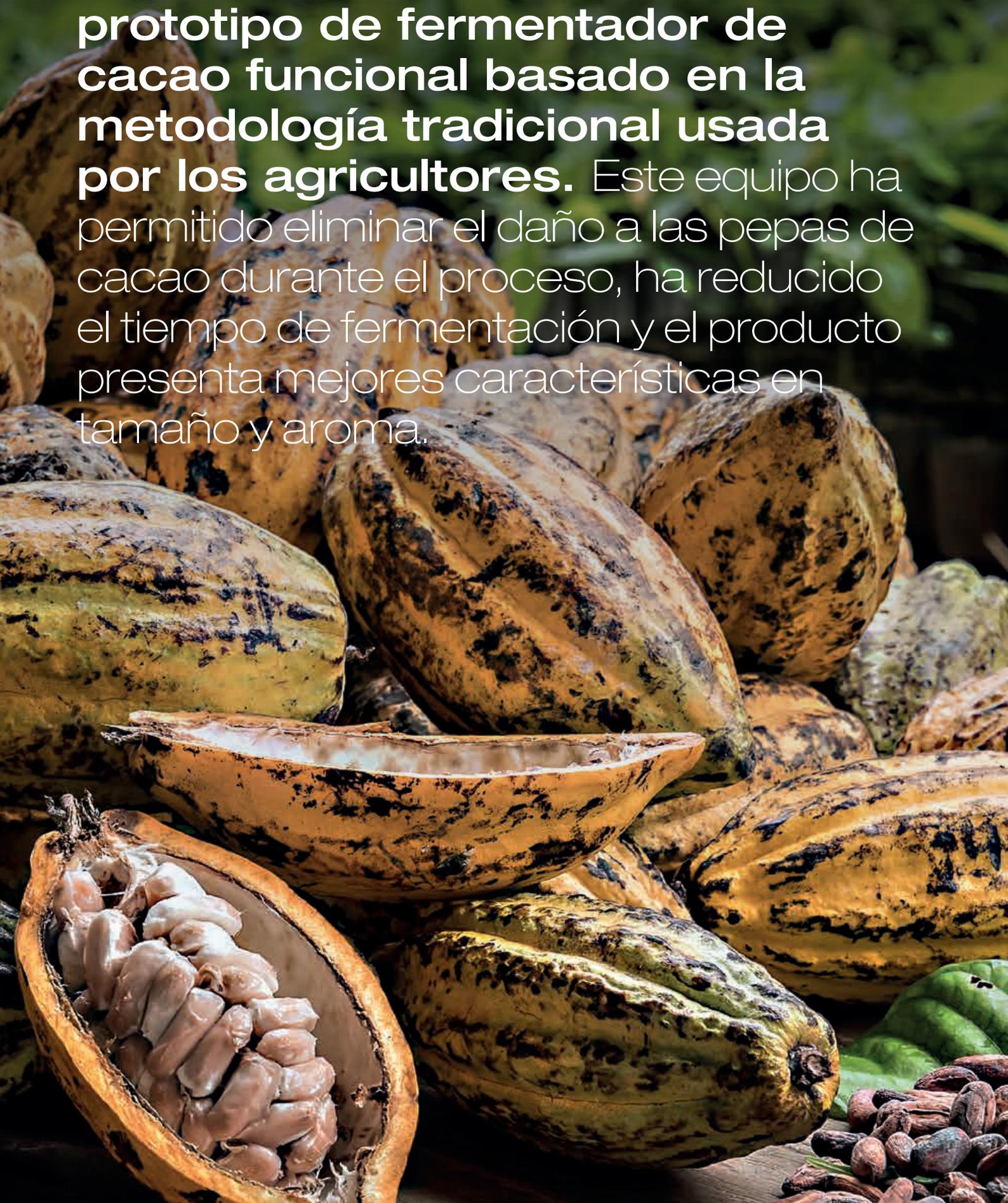
El Fab Academy es un programa internacional que se originó en el curso de prototipado rápido del MIT de los EUA.

El objetivo es desarrollar expertos en fabricación digital mediante el uso de *software* de diseño, impresoras 3D, impresoras láser, controladores electrónicos, entre otros elementos propios de un Fab Lab o laboratorio de fabricación digital.

El programa se desarrolla en el Fab Lab de Tecsup y es impartido por docentes certificados y Neil Gershenfeld, Director del CBA del MIT.

**FAB
FAB**
ACADEMY
FAB LAB TECSUP

Se ha diseñado y construido un prototipo de fermentador de cacao funcional basado en la metodología tradicional usada por los agricultores. Este equipo ha permitido eliminar el daño a las pepas de cacao durante el proceso, ha reducido el tiempo de fermentación y el producto presenta mejores características en tamaño y aroma.



Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional

Design of Automatic Cocoa Fermenter Based on a Traditional Process

RESUMEN

El proceso de fermentación del cacao es crucial para garantizar la calidad del producto y es el dispositivo clave para una fermentación exitosa. En las poblaciones rurales, el proceso de fermentación se realiza con simples dispositivos de madera, lo cual da como resultado un gran consumo de mano de obra con bajas tasas de producción. En este proyecto, recogemos las experiencias de los procedimientos tradicionales utilizados por los artesanos del cacao para diseñar un prototipo que se ajuste a sus necesidades.

El diseño del contenedor comienza con la selección adecuada de la madera para que no impregne el producto con aroma o sabor. Además, debemos ser capaces de controlar los parámetros importantes del proceso, como la temperatura y el pH del fermento. Para llevar a cabo un procedimiento de mezcla en el mismo contenedor por medio de varios patrones de movimiento a fin de lograr una reorganización uniforme de las semillas, se evita eliminar manualmente las semillas que generalmente terminan golpeadas y maltratadas, lo que reduce la calidad del producto final. El movimiento también permite mantener las semillas aireadas durante la fermentación. Este se basa en la información de los sensores y la actuación de un motor eléctrico para controlar dicho movimiento.

Los pequeños agricultores son responsables de, aproximadamente, el setenta por ciento de la producción mundial total de cacao y la mayor parte de esta producción se produce en áreas de alta biodiversidad. Los ensayos se realizaron sobre la base de este prototipo y el proceso de fermentación se desarrolló con el nuevo diseño.

Podemos decir entonces, que los objetivos establecidos para este proyecto son: tener un mejor control de los parámetros de procesamiento, una reducción del trabajo manual, un aumento en la tasa de producción, y mejores ingresos y condiciones de vida de la población rural dedicada a esta actividad económica. En fin, dar mayor valor agregado al producto promoviendo la incorporación de más productores de cacao, incluidas las comunidades nativas.

ABSTRACT

The cocoa fermentation process is a crucial factor to ensure the quality of the product and it is the key device for a successful fermentation. In rural populations, the fermentation process is made with simple wooden devices which results in a lot of hand labor with low production rates. In this project, we collect the experiences of the traditional procedures used by the cocoa artisans to design a prototype that fits their requirements.

The design of the container starts with the appropriate selection of the wood so that it does not impregnate the product with aroma or flavor. Also, we should be capable to monitor important parameters of the process such as temperature and pH of the ferment. In order to carry out a mixing procedure in the same container by means of several movement patterns and achieve a uniform rearrangement of the seeds, it is avoided manual removal of the seeds that usually end up beaten and mistreated, thus reducing the quality of the final product. The movement also allows keeping the seeds aerated during fermentation and is based on information from the sensors and the action of an electrical motor to control such movement.

Smallholder farmers are responsible for roughly seventy percent of total global cocoa production and most of this production occurs in areas of high biodiversity. Trials were conducted based on this prototype and the process for fermentation was developed with the new design.

We can say then that the goals set for this project are to get a better control of the processing parameters, a reduction in hand labor, a raise in production rate and better income and life conditions of rural population dedicated to this economic activity. Finally, to give greater added value to the product, promoting the incorporation of more cocoa farmers, including native communities.



Palabras clave

Fermentación de cacao, fermentación en contenedor, semilla de cacao

Key words

Cocoa fermentation, container fermentation, cocoa seed.

INTRODUCCIÓN

Un proceso de fermentado deficiente reduce la calidad del producto, lo cual trae como consecuencia bajos precios de compra cuando el producto final es comercializado. En el presente trabajo, se ha desarrollado un prototipo de fermentador de cacao basándonos en la metodología tradicional usada por los agricultores que se dedican a este cultivo. El objetivo es diseñar y construir un fermentador de cacao funcional que permita eliminar el daño a las pepas de cacao durante el proceso, que el resultado de la fermentación se realice en menor tiempo y con un producto de mejores características (tamaño, aroma). Esto permitirá dar una alternativa factible y eficiente que mejore el producto final. Se realizó un estudio basado en los procedimientos tradicionales y los requerimientos necesarios para plantear el modelo mecánico del equipo y la definición de los sensores y la electrónica que lo acompaña. El estudio partió desde el diseño del contenedor, la forma de la cavidad interior y exterior, la identificación de las características del motor a usar para el accionamiento mecánico y, finalmente, de la electrónica que se empleó para la toma de datos y los botones de mando del equipo.

Los resultados alcanzados permiten establecer la validez del diseño y la metodología de trabajo planteado.

FUNDAMENTOS

1. El cacao y su procesamiento

El cacao es una planta nativa de América Central. Desde tiempos inmemoriales, la expansión en la producción y el consumo de chocolate de cacao ha sido la fuente económica de muchas naciones debido a sus múltiples usos.

El cultivo del cacao requiere la sombra de árboles especiales, generando un sistema agroforestal que se asemeja al bosque original. Esto ha servido para mantener a muchas familias en los campos de cultivo y en el proceso de transformación en chocolate de cacao.

Clasificación taxonómica:

Reino	Vegetal
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magniolopsida
Subclase	Dilleniidae
Orden	Malvales
Familia	Esterculiaceae
Subfamilia	Byttnerioideae
Tribu	Theobromeae
Género	Género
Especies	<i>Theobroma cacao</i> L.

Tabla 1. Clasificación taxonómica.
Fuente: Elaboración propia.

La fruta de cacao es una vaina que tiene módulos visibles en los surcos. En su interior, presenta cinco hileras de semillas o almendras cubiertas de pulpa o mucílago, de sabor dulce y agradable aroma [6]. El número de semillas por fruto varía en promedio de 20 a 40, en algunos casos.

Excepcionalmente, alcanzan 50 semillas, dependiendo del tamaño de la vaina. La vaina madura entre 5 y 7 meses de la fertilización. Los clones de cacao se clasifican utilizando caracteres de la cápsula. Por ejemplo:

A. Color

Antes de la madurez, el color de la vaina puede ser verde, rojo violeta y verde parcialmente pigmentado rojo violeta según el clon. El color verde cambia a amarillo y el color rojo violeta cambia a naranja.



Figura 1. Tipos de frutas de cacao.
Fuente: [6].

B. Tamaño

Es variable entre 10 y 30 cm de largo, y de 7 a 12 cm de diámetro. El grosor del caparazón es de 1 a 2 cm.

C. Formas

Los frutos, por su forma, se clasifican en angoleta, amelonado, cundeamor y calabacillo.



Figura 2. Angoleta, cundeamor, amelonado, calabacillo.
Fuente: [6].

D. Semilla

La semilla de cacao o almendra tiene forma de frijol, pero varía mucho de forma triangular, ovoide, alargada o redondeada, plana o aplastada con una longitud de 20 a 30 mm, cubierta

con un sabor a pulpa mucilaginoso con sabor agridulce[1]. El proceso de germinación comienza cuando la mazorca alcanza su madurez fisiológica. El peso varía de 2 a 3.7 g dependiendo de la genética de la mazorca.



Figura 3. Forma de la semilla.
Fuente: [6].

2. Variedades

El cacao es una especie alógama con un 95 % de polinización cruzada. Por genética, se clasifican en tres grupos principales: criollos, forasteros y una mezcla de ellos que se llama trinitarios.

A. Cacao criollo

Tipo genético de cacao cuyo cultivo se dispersó de México a América Central, de alta calidad y sabor agradable. Ha sido domesticado y adaptado a diferentes áreas. La planta es muy delicada, de baja productividad y susceptible a enfermedades. Se puede distinguir por la arquitectura de un árbol débil, hojas grandes y oscuras, los nuevos brotes son de color verde pálido, estaminodios de color rojo intenso, el tipo de vaina es rústica con una capa fina y forma de cundeamor[2].

La almendra es blanca, con sabor y aroma a chocolate, superior a cualquier tipo de cacao en el mundo. Tiene una gran demanda en el mercado nacional e internacional.



Figura 4. Cacao criollo, foráneo, trinitarios.
Fuente: [6].

B. Cacao forastero o foráneo (amazónica)

Originarios de la cuenca del Amazonas, son árboles robustos de hojas grandes y pequeñas, con vainas de tipo amelonado, cáscara dura, gruesas y lisas, almendras aplanadas y pigmentadas, tolerantes a plagas y se adaptan muy bien a diferentes ambientes. El sabor de las almendras es amargo.

C. Cacao trinitarios

Es el cacao que más se cultiva en América. Se considera como un híbrido natural de los dos primeros tipos de cacao. Por esta razón, presenta una gran variabilidad y es donde ha surgido excelentes genotipos de gran robustez, resistencia a plagas y mayor rendimiento. *Trinitarios* proviene de Trinidad, Islas de las Antillas Menores, donde los ingleses fundaron un famoso instituto de investigación sobre el cacao, la *Imperial College Station*.

3. Etapas del procesamiento del cacao

A. Cosecha

El cacao da producción al tercer o cuarto año de su establecimiento. Todo el año con picos de producción entre abril y junio, y entre noviembre y diciembre.

Con una buena semilla y aplicando las técnicas apropiadas, puede tomar de 15 a 20 quintales por hectárea[3]. Las vainas toman tiempo para madurar entre 5 y 7 meses, cuando observan en ellas un cambio de color. El corte se hace con mucho cuidado para no dañar el cojinete floral. Las herramientas se usan como halcones y machetes, cortos y afilados.

La ruptura de la cápsula se realiza golpeándola con un objeto para eliminar el grano y separar el mucílago. Una práctica tradicional es lavar el grano y secarlo inmediatamente. En este proceso, el cacao pierde calidad.

B. La fermentación

La fermentación es muy importante para la calidad del cacao. En este proceso, el cacao obtiene el aroma, el sabor y el color característicos del chocolate de la variedad o clon utilizado.

La fermentación dura entre 5 y 7 días cuando la temperatura sube hasta 45 grados y el embrión muere.

Las pepas o semillas, y la baba o mucílago se colocan en cajas de madera y se mueven una vez al día para tener una fermentación uniforme.



Figura 5. Fermentación.
Fuente: [6].

C. Secado y embalaje

El secado del cacao se realiza en cajas de madera, sacudidores o patios de concreto colocados al sol, o en secadores artificiales como estufas. Con buen sol, el secado dura una semana para tener el 7 a 8 % de humedad en el grano, y es embalado en bolsas de yute.

D. Tostado y procesamiento de cacao

Con el cacao después de la fermentación y el secado, se llevan a cabo los procesos de tostado, alcalinización y molienda para luego proceder a la producción de chocolate.



Figura 6. Cacao procesado.
Fuente: [6].

4. Proceso artesanal de la fermentación del cacao

Los pasos para el procedimiento de fermentación del cacao son los siguientes [7]:

A. Triturar

Consiste en dividir la vaina y extraer las almendras, que, una vez separadas de la placenta, serán sometidas a fermentación. La rotura de las vainas se realiza con herramientas acondicionadas, especialmente, para este trabajo, como machetes cortos o con trozos de madera para golpear y abrir. Se debe tener cuidado de no dañar las almendras que permanecen unidas a la placenta.

La separación de los granos se hace a mano. El bombardeo se realiza inmediatamente después de romper la mazorca. El tiempo entre el rompimiento y la fermentación no debe exceder las 24 horas.

Cuando se termina la cosecha, se determinan varios puntos dentro de la plantación donde las vainas se amontonan, se rompen las cáscaras, y luego las almendras se transportan en cubos o bolsas de plástico a los fermentadores.



Figura 7. Extracción de las pepas. Fuente: [6].

B. Fermentación

La fermentación es un paso muy importante para tener un cacao de alta calidad, con aroma, sabor y color de chocolate.

Las almendras de cacao se fermentan en contenedores especiales, en lugares protegidos y bien ventilados, por un periodo de tres a seis días, dependiendo del tipo de cacao y el área [4].

Las almendras, para fermentar, se revuelven cada veinticuatro horas de un cajón a otro o dentro del mismo cajón, si es que el volumen lo permite, y hasta que las almendras toman un color marrón o chocolate con incrustaciones o rayas pronunciadas. Durante el resto de tiempo, la temperatura aumenta y se estabiliza a 45 ° C. Una fermentación deficiente provoca un color violeta o blanquecino que se observa al dividir las almendras por la mitad.

Durante este proceso, los azúcares en el mucílago son fermentados y convertidos en alcohol por las levaduras. Luego, esto se transforma en ácido acético (oxidación) por bacterias acéticas. Dentro de la semilla, ocurren una serie de cambios, tales como la muerte del embrión, el cambio de coloración del violeta al chocolate, cambia del sabor amargo al sabor del chocolate y la separación de los cotiledones de la semilla.

Con la muerte del embrión, hay una mayor permeabilidad de las paredes celulares y una producción de jugos celulares. Las enzimas se ponen en contacto con los polifenoles y las proteínas, iniciando luego un proceso de hidrólisis.

Este proceso es responsable del cambio del sabor característico del chocolate, transformando la proteína en aminoácidos. De esta forma, la hidrólisis de polifenoles ocurre por enzimas.

Método de fermentación de caja

Las cajas de madera con perforaciones en el fondo se utilizan para la escurridía de los jugos. Se pueden colocar en irregularidades (tipo escalera) para facilitar el giro. El tamaño de las cajas depende del volumen de producción para fermentar.

Método de la caja de Rohan

Es otro método simple, fácil de operar, económico e ideal para pequeños y medianos productores. La caja de Rohan está hecha de madera con dimensiones de 1.2 m de largo, 0.8 m de ancho y 0.12 m de profundidad. Se coloca una sobre otra, en una cantidad de diez [5]. Con este método, la masa de cacao no se voltea, las cajas cambian sus posiciones cada veinticuatro horas y tienen el doble propósito de fermentar y secar (para cada caja de fermentado se requieren dos para el secado).

C. Secado de cacao

Es el proceso en el que el grano pierde humedad hasta llevarlo al 6 %, que queda listo para el mercado y/o para almacenarlo. Este proceso se puede hacer al sol o artificialmente.

Secado al sol

Es la forma más utilizada y que garantiza una buena calidad de cacao [8], se logra durante 6 a 8 días de sol. Se coloca el cacao en capas finas sobre una plataforma de madera o bambú mate que son materiales que no transmiten sabores u olores extraños. El método de deslizamiento de cajones de madera, con techo, fijo o móvil, es el más eficaz. El modelo a usar depende de la capacidad económica del productor.

METODOLOGÍA

1. Diseño de la caja de fermentación

En esta parte, definiremos dos matrices que nos permitirán identificar qué requisitos de diseño debe cumplir el prototipo.

Requisitos	Alternativa 1	Alternativa 2
Debe contener las semillas de cacao y drenar el jugo.	A través de hendiduras	A través de los hoyos
Debe permitir remover las semillas sin dañarlas.	Manualmente	A través de mecanismos
Debe permitir ventilar las semillas durante la fermentación.	A través de ranuras y agujeros arreglados	A través de hendiduras y agujeros muebles
Debe mantener la temperatura durante la fermentación.	Contenedor cerrado	Contenedor con aberturas
Debe permitir rotar o mover para ventilar las semillas mientras las agita al mismo tiempo.	Girar el contenedor	Voltear el contenedor

Tabla 2. Requisitos de movimiento y ventilación.
Fuente: Elaboración propia.

Se definieron dos alternativas para cada requerimiento [9], de entre las cuales se seleccionó una, considerando la simplicidad mecánica y el menor uso de materiales.

Requisitos	Alternativa 1	Alternativa 2
La temperatura debe mantenerse durante la fermentación.	Contenedor cerrado	A través del calentador y ventilador
El jugo de las semillas debe drenarse continuamente durante la fermentación.	Por gravedad	A través de mecanismos
El mucílago se debe agitar fácilmente.	Manualmente	A través de mecanismos
El PH debe ser mensurable durante el proceso.	Manualmente	Automáticamente

Tabla 3. Requisitos del proceso de fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

Se usó una estrategia de trabajo con la que se obtuvieron los requerimientos y con ello se realizó el diseño mecánico en 3D del fermentador. La figura 8 muestra el procedimiento seguido.

Los planos resultantes para el proceso de prototipado y maquetizado se muestran en la figura 9. Este primer prototipo se realizó en acrílico de 4 mm transparente para observar cómo encajaban todas las piezas.

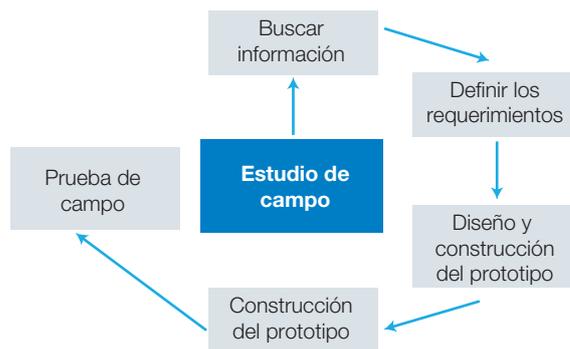


Figura 8. Estrategia seguida para el diseño del fermentador.
Fuente: Elaboración propia.

Los planos para el corte y el modelo ensamblado se muestran en la figura 9 y la figura 10.

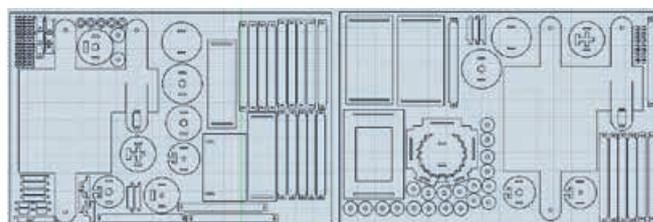


Figura 9. Planos para corte láser.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Modelo del fermentador de cacao.
Fuente: Elaboración propia.

2. Diseño de la etapa electrónica

La etapa electrónica está compuesta por sensores, un controlador y un actuador. El diagrama de conexión se muestra en la figura 11. Se ha incluido un presentador gráfico o pantalla que nos muestre los valores de la temperatura, pH, así como los tres estados operativos del equipo.

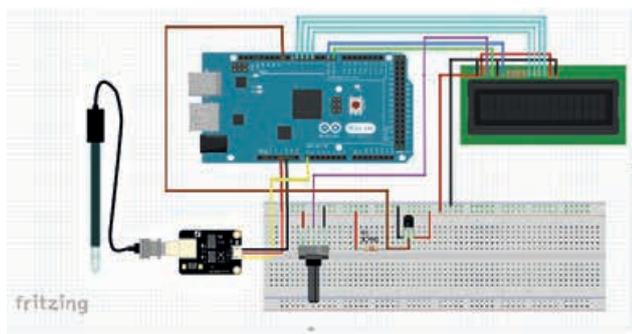


Figura 11. Esquema de conexiones.
Fuente: Elaboración propia.

Los dos tipos de sensores utilizados fueron el sensor de temperatura DS18B20 y el medidor de control del monitoreo del módulo del sensor del regulador de detección del valor líquido PH 0-14 + Sonda de electrodo BNC pH. La siguiente imagen muestra ambos sensores.

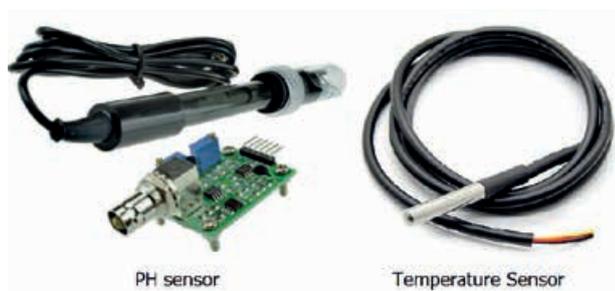


Figura 12. Sensor de PH y de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

El sensor de temperatura es un dispositivo electrónico que funciona como termómetro y tiene una alta precisión en un amplio rango (precisión $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo que significa que el rango de trabajo es de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. La forma de conectarse debe ser una resistencia *pullup* de, aproximadamente, 5 K en todos los casos.

También podemos usar varios sensores y recopilar información de todos ellos; en nuestro caso, usaré dos.

La figura 13 muestra cómo se conectaron más de 2 sensores.

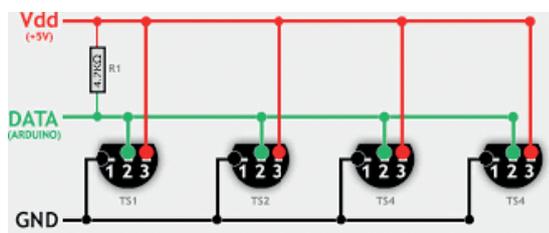


Figura 13. Esquema de conexión para varios sensores de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

Las características del sensor de pH se muestran en la tabla 4. El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una solución, la escala de pH varía de 0 a 14. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno $[\text{H}^+]$ presentes en ciertas soluciones. Se puede cuantificar con precisión mediante un sensor que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (plata o cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ion de hidrógeno.

Características:

- Voltaje de calentamiento: $5 \pm 0.2\text{ V (AC \cdot DC)}$
- Corriente de trabajo: 5-10 mA
- Rango de concentración detectable: PH0-14
- Detección del rango de temperatura: 0-80 $^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de respuesta: $\leq 5\text{ s}$
- Tiempo de estabilización: $\leq 60\text{ s}$
- Componente de energía: $\leq 5\text{ W}$
- Temperatura de trabajo: $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura nominal de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Humedad: 95 % HR (humedad nominal del 65 % de humedad relativa)
- Tamaño del módulo: 42 mm x 32 mm x 20 mm
- Salida: salida de señal de voltaje analógico
- Con 4 pcs agujeros de montaje M3

Tabla 4. Características del sensor de pH.
Fuente: Elaboración propia.

Después de usar el sensor, necesita ser calibrado de la siguiente manera:

- a. Hay dos potenciómetros en el circuito. El que está más cerca del conector BNC de la sonda es el que regula el desplazamiento, el otro mide el límite de pH.
- b. Desplazamiento: El rango promedio de la sonda oscila entre los valores negativos y positivos. El 0 representa un pH de 7.0. Para poder usarlo con Arduino, este circuito agrega un valor de compensación al valor medido por la sonda. De esta forma, el ADC solo tendrá que tomar muestras de valores de voltaje positivo. Por lo tanto, forzaremos un pH de 7.0 desconectando la sonda del circuito y cortocircuitando la parte interna del conector BNC con el exterior. Con un multímetro, medimos el valor Po pin y ajustamos el potenciómetro para que sea 2.5 V.
- c. Límite de pH: Este potenciómetro es para establecer un valor límite del circuito del sensor de pH que genera que el led rojo se encienda y que la señal Pin se active.



Figura 14. Interfaz del sensor de pH con conexión BNC.
Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación del programa, usamos un Arduino Mega, donde cargamos el programa de medición de parámetros del sensor.

La estructura del programa se muestra en la figura 15.

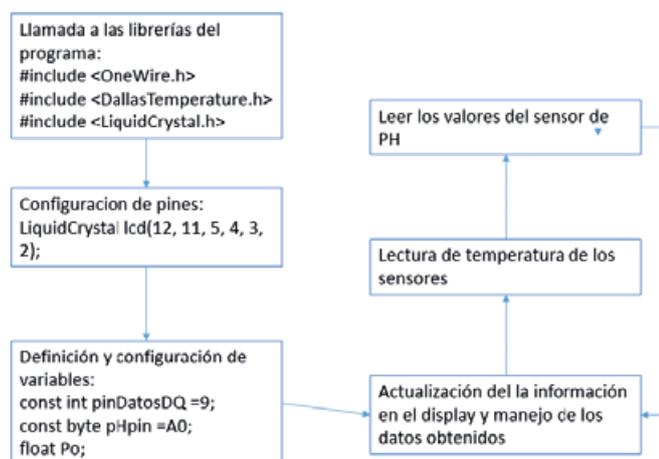


Figura 15. Diagrama de bloques del programa.
Fuente: Elaboración propia.

3. Diseño del accionamiento

Para el diseño del motor y su controlador, modificamos la estructura básica utilizada en la primera parte. La figura 16 muestra el modelo mejorado en el que se ha simplificado la mecánica del acoplamiento del motor.

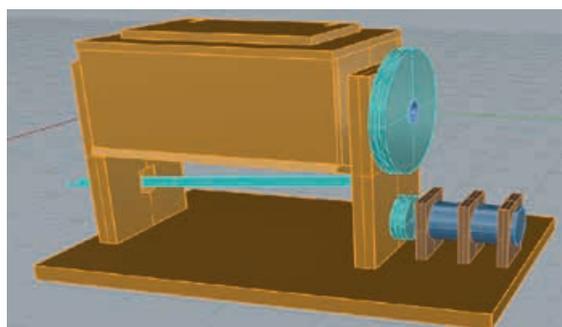


Figura 16. Diseño mejorado del fermentador.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, para estimar las características del motor, es necesario calcular primero el par mínimo que se debe lograr para mover el fermentador con el producto dentro.

Para estimar el nivel de torque requerido en el motor, medimos y determinamos el peso aproximado y el volumen de un grano de cacao. Luego, determinamos el volumen aproximado del contenedor que no debe incluir las semillas, ya que estas deben eliminarse en el proceso. Con base en esto, se determina la cantidad de semillas aproximadas que se utilizarán y su valor aproximado (Tabla 5).

Peso promedio de la cáscara de cacao (g)	3.2478
Volumen aproximado de guijarro de cacao (cc)	4.5
Volúmen del contenedor (cc)	1770.2916
Número de frutos que se requerirán en cada relleno (3/4 del total)	7.71
Peso aproximado de las semillas (g)	1277.68

Tabla 5. Peso aproximado a moverse.
Fuente: Elaboración propia.

La fuerza requerida para mover el contenedor, como se muestra en la figura por medio de un dinamómetro, fue de 200 g.

Con estos datos, estimamos la fuerza requerida en la polea de menor diámetro y la cantidad de torque en el motor.



Figura 17. Medida de torque en la polea.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la distribución de fuerzas en la figura y utilizando los principios de la física, la primera y la segunda ley de Newton, se obtienen para que la mínima fuerza necesaria para romper la inercia del fermentador sea:

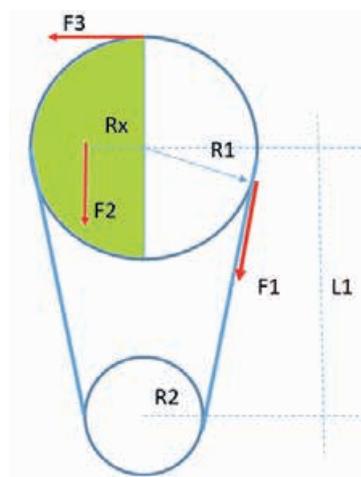


Figura 18. Diagrama de fuerzas en las poleas del contenedor.
Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama que se muestra, R1 mide 7.5 cm; R2, 2.5 cm; L1, 14 cm; Rx es el radio al centro de gravedad igual a 3,18 cm. Asimismo, F1 representa la fuerza de transmisión a la polea del motor, F2 es la fuerza opuesta en el peor caso, cuando las semillas están a 90 grados de perpendicularidad considerando la ubicación de esta fuerza en el centro de gravedad de la mitad del cilindro. F3, finalmente, es la fuerza mínima para romper la inercia del contenedor medido previamente.

Usando la ecuación:

$$\sum F \cdot d = 0 \tag{1}$$

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_x + F_3 \cdot R_1 \tag{2}$$

La fuerza F_1 es igual a 741.73 gramos de fuerza. Aplicando al motor el torque requerido para el radio R_2 , resulta en 1854.34 gramos de fuerza, moviéndose a unidades de newton tenemos 1818.48mNm.

El motor usado tiene las siguientes características: DC24V, 1.18 Nm, 30 +/- 4 rpm.



Figura 19. Motor utilizado en el prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

La idea de utilizar un cinturón de tracción tenía el problema del deslizamiento cuando el movimiento alcanzaba las coronas debido a la inercia de la caja de fermentación.

La acción de movimiento final se lleva a cabo mediante un modelo basado en una palanca para evitar los problemas de deslizamiento de la correa en la polea. La palanca de la palanca se extendió para aumentar el nivel de fuerza y el ángulo de movimiento.

La figura 20 presenta los detalles de las dimensiones que se lograron en la solución al problema del deslizamiento en las poleas.

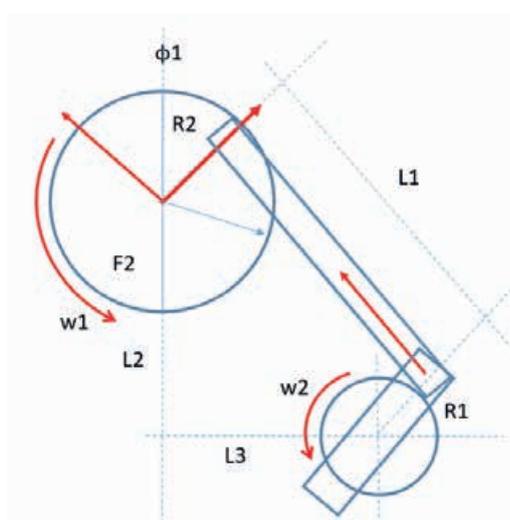


Figura 20. Diagrama de transmisión de movimiento.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de las dimensiones son $L_1 = 19$ cm, $L_2 = 19.3$ cm, $L_3 = 11.5$ cm, $R_1 = 4$ cm, $R_2 = 6.5$ cm, $\phi_1 = 78.78^\circ$. La figura 21 muestra esta parte del equipo.



Figura 21. Implementación del transmisor de movimiento.
Fuente: Elaboración propia.

4. Implementación final del equipo

Para llevar a cabo el montaje final del equipo, se relacionaron las pruebas individuales de la parte mecánica, los sensores y la parte electrónica. Después de que se llevó a cabo el ensamblaje, la interfaz de usuario tiene una pantalla que muestra la temperatura del interior y la cámara de fermentación, la lectura del pH resultante del jugo que filtra de las semillas durante el proceso y un teclado que le permite vivir en dos velocidades diferentes. La figura 22 muestra el equipo ensamblado.



Figura 22. Prototipo del fermentador de cacao.
Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de control del panel de apertura son las siguientes: (ON / OFF) encendido y apagado, (MOD0 1) giro alternado a baja velocidad, (MOD0 2) rotación continua, (MOD0 3) giro alternado a alta velocidad, (MOD0 4) detener rotación, (T° 1) temperatura interior, temperatura exterior (T° 2), valor pH (PH) e indicador MOD0 del modo de trabajo.

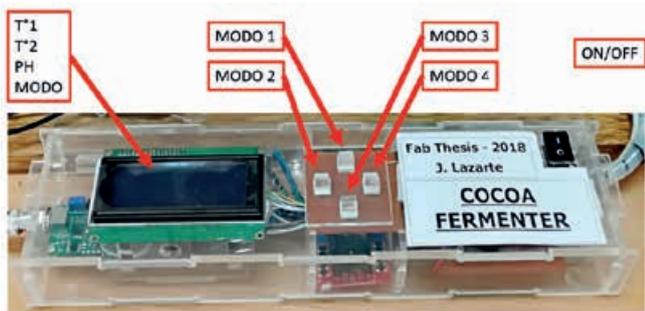


Figura 23. Funciones de control.
Fuente: Elaboración propia.

Fases del proceso de fermentación a seguir:

Día 1: La temperatura dentro del fermentador debe variar de 26 a 28 °C en el día y de 20 a 24 °C en la noche. El pH permanece constante a, aproximadamente, -6.00. Se realiza un movimiento suave y constante.



Figura 25. Inicio de la fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

La calidad del cacao para la producción de chocolate se basa en la genética de la planta. Sin embargo, para obtener un producto de calidad, se consideran dos procesos: 1) la siembra y 2) el proceso de fermentación. Durante la fermentación, se generan dos etapas: 1) el desarrollo de bacterias de ácido láctico (BAL) y 2) el desarrollo de bacterias de ácido acético (AAB).

Casi la mitad del cacao en el mundo se fermenta en cajas de madera de varios tamaños, la otra mitad en métodos más tradicionales.

Para las pruebas realizadas con el fermentador, se utilizó el cacao de tipo criollo y un peso aproximado de 410 gramos.

Día 2: Al final del día 2, la temperatura oscila entre 33 y 34 °C. El valor del pH permanece constante a aproximadamente 4.70. La acción a realizar es un movimiento suave y constante.



Figura 24. Materiales usados en las pruebas.
Fuente: Elaboración propia.

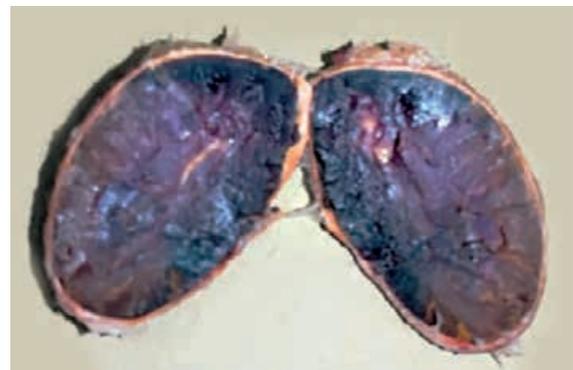


Figura 26. Cacao con dos días de fermentación.
Fuente: Elaboración propia.

Día 3: Al final del tercer día, la temperatura oscila entre 33 y 34 °C, el pH casi alcanza 3.37. Un movimiento más fuerte comienza.

Días 4 y 5: La temperatura se mantiene entre, aproximadamente, 35 y 40 °C. De nuevo, se realiza un movimiento suave y el pH disminuye a 3.75.

Día 6: La temperatura se mantiene entre 25 a 28 °C. De nuevo, se realiza un movimiento suave y el pH disminuye a 3.75. Un movimiento más fuerte comienza.

Después de seis días de fermentación, el secado se llevó a cabo en un ambiente cuya temperatura estuvo entre 35 y 42 °C, lo que permitió un secado uniforme, obteniéndose el producto final mostrado.



Figura 27. Pepas de cacao secas.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El proceso de purificación funcionó, y se obtuvo una abundante escorrentía de jugo, lo que nos permitió medir fácilmente el pH, que en un valor alto de -6 aproximadamente.
- A medida que la temperatura aumentó, la cantidad de jugo se redujo y se hizo más espesa con una consistencia más densa, y el pH se redujo a aproximadamente 3,37.
- Se confirma que el movimiento de balanceo permite una correcta ventilación, por lo que el mecanismo es adecuado para el requerimiento del proceso de fermentado.
- El resultado final tiene un aroma muy fuerte y un color atractivo como se muestra en la figura 28 lo que permite concluir que el equipo es adecuado para llevar a cabo el proceso de fermentación con éxito.

- Existe una dependencia entre el nivel de pH y el calor que mantiene la fermentación. Es importante que la temperatura tenga un mínimo de 30 ° C y no más de 45 ° C. De lo contrario, el resultado genera un producto con poco aroma y un color muy oscuro y de sabor algo ácido.



Figura 28. Cacao fermentado y seco.
Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] Adeyeye, E., Akinyeye, R., Ogunlade, I., Olaofe, O., y Boluwade, J. (2010). Effect of farm and industrial processing on the amino acid profile of cocoa beans. *Food Chemistry*. 118(2), 357–363.
- [2] Bentley, J., Boa, E., y Stonehouse, J. (2004). Neighbor trees: shade, intercropping, and cacao in Ecuador. *Human Ecology*. 32(2), 241–270.
- [3] Dubón, A. (2016). *10 consejos para lograr cacao de calidad*. La Lima, Cortés, Honduras, C. A.: Centro de Comunicación Agrícola (FHIA).
- [4] Guevara, J. (2018). A Step-by-Step Explanation of Cacao Harvesting & Processing. *Perfect Daily Grind*. Recuperado de <https://www.perfectdailygrind.com/2018/02/step-step-explanation-cacao-harvesting-processing/>
- [5] Institut africain pour le développement économique et social (INADES) y FAO. (1970). *Cocoa*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/006/ad220e/AD220E00.htm#TOC>
- [6] INTA Nicaragua. (2009). *El Cacao*. (12).
- [7] INTA Nicaragua. (2009). *El Cacao*. (4).
- [8] Kostinek, M., et al. (2008). Diversity of predominant lactic acid bacteria associated with cocoa fermentation in Nigeria. *Curr. Microbiol.* 56(4), 306–314.
- [9] Lefeber, T., Gobert, W. Vrancken, G., Camu, N., y De Vuyst, L. (2011). Dynamics and species diversity of communities of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria during spontaneous cocoa bean fermentations in vessels. *Food Microbiol.* 28, 457–464.

ACERCA DE LOS AUTORES

Sixto Roberto Delgado Valdivia

Ingeniero electrónico egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Comenzó su carrera profesional en ITINTEC como ingeniero de diseño en proyectos de investigación de tecnología industrial y también como evaluador de patentes de invención. Más tarde, asumió funciones como supervisor de proyectos de investigación, presidente del Comité de Normalización y jefe de la oficina de ingeniería del departamento de Electrónica de ITINTEC. Trabajó en Entel Perú y empresas privadas en la implementación de proyectos de telecomunicaciones e implementación de laboratorios y talleres para la construcción de equipos electrónicos. Actualmente, es coordinador de Fab Lab y coordinador de la carrera de Diseño Industrial en Tecsup. Graduado del diploma de la Academia FAB en el 2012. Es instructor, evaluador global y mentor de la Academia Fab.

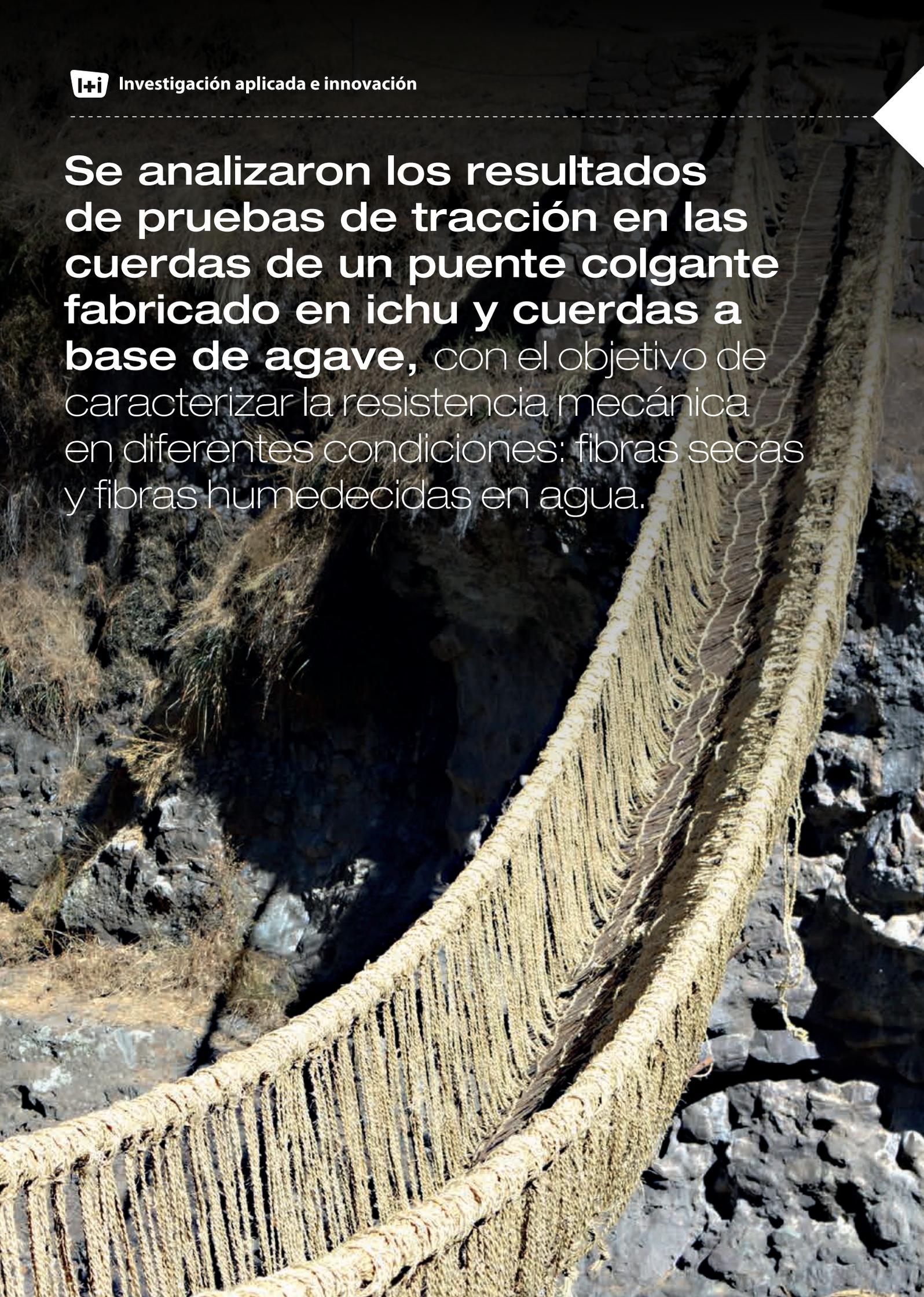
@ rdelgado@tecsup.edu.pe

José Jacob Lazarte Rivera

Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional de Ingeniería. Ha participado en programas de capacitación en aplicaciones de electrónica industrial en el Instituto Politécnico de Incheon en Corea del Sur. Graduado del programa *Fab Academy* en 2014 en fabricación digital, tiene la certificación *Train the Trainer* otorgada por Bosch Rexroth de Alemania en *Automation Systems and Industry 4.0*. Tiene experiencia en mantenimiento electrónico y desarrollo de soluciones en el campo de la electrónica industrial, como consultor para empresas locales. Profesor a tiempo completo en Tecsup, enseña cursos relacionados con electrónica analógica y digital. Asimismo, está a cargo del Laboratorio de Electrónica de Potencia en el departamento de Electricidad y Electrónica de Tecsup. También imparte cursos de especialización y diplomas para profesionales de la industria, especialmente, en las áreas de control electrónico de potencia y control automático de motores eléctricos.

@ jlazarte@tecsup.edu.pe

Se analizaron los resultados de pruebas de tracción en las cuerdas de un puente colgante fabricado en ichu y cuerdas a base de agave, con el objetivo de caracterizar la resistencia mecánica en diferentes condiciones: fibras secas y fibras humedecidas en agua.



Caracterización de cuerdas de ichu y de agave usados en estructuras colgantes

Characterization of Ichu and Agave Ropes used in Hanging Structures

RESUMEN

Se aborda un estudio sobre la resistencia mecánica de materiales usados en la fabricación de puentes colgantes empleados en la región andina. Uno de ellos es el pasto del Altiplano, llamado *ichu* (*Stipa ichu*). El otro es una fibra manufacturada de uso comercial. Se realizaron ensayos de tracción en ambas para calcular la fuerza de rotura y la resistencia mecánica. Se muestran los resultados en diferentes condiciones: fibras secas y fibras encharcadas con agua, con el propósito de correlacionar la resistencia mecánica con la humedad que puede contener los materiales en condiciones de trabajo.

ABSTRACT

It is addressed a study on the mechanical strength of materials used in the manufacture of hanging bridges applied in the Andean regions. One of them is the grass of the Andean regions called Ichu (Stipa Ichu). The other is a manufactured fiber for commercial use. There were performed traction tests on both fibers to calculate the breaking strength and mechanical strength. The results are shown in different conditions: dry fibers and fibers soaked with water, in order to correlate the mechanical resistance with the moisture that is able to contain the materials in working conditions.

INTRODUCCIÓN

Los relatos históricos escritos por los primeros europeos en los Andes mencionaron los puentes colgantes tejidos en fibras. Estas estructuras, aparentemente delicadas, eran una novedad para ellos, y al cruzar las primeras veces, su comportamiento oscilante les causaba considerable temor. Los puentes colgantes impresionaron casi a todo el mundo, tanto a los europeos como a los nativos andinos. Diversos materiales fueron usados en su elaboración como el sauce (*Salix humboldtiana*), chilca (*Baccharis spp*), chuchau (*Fourcoroya andina*), entre otros materiales naturales [5]. La figura 1 muestra un puente colgante fabricado en fibra de ichu en la ciudad del Cusco en Perú y que, actualmente, se encuentra en las instalaciones de la Tecsup Sede Centro.



Figura 1. Puente colgante fabricado en ichu.
Fuente: Elaboración propia.



Palabras clave

Resistencia mecánica, cuerdas de fibra, ichu, agave. Tracción. Altiplano, Estructuras colgantes.

Key words

Mechanical strength, fiber string, ichu, agave, fiber ropes, hanging structures, traction, Andean region

En este trabajo, serán analizados los resultados de pruebas de tracción en las cuerdas de un puente colgante fabricado en ichu y cuerdas a base de agave, ambos procedentes de los andes peruanos.

El objetivo es caracterizar la resistencia mecánica de las cuerdas en diferentes condiciones: fibras secas y fibras humedecidas en agua. Los resultados correlacionan resistencia a la tracción para seleccionar otras alternativas para la construcción de futuras estructuras colgantes, como los puentes en cuestión.

FUNDAMENTOS

El uso de fibras naturales locales y baratas es una gran alternativa, especialmente, para actualizar o renovar construcciones rudimentarias. En las zonas situadas por encima de los 3 000 metros sobre el nivel del mar, las fibras naturales son vastas y baratas (~0.15 USD/kg), sobre todo, las fibras denominadas ichu [3].

La creciente sensibilidad hacia la contaminación ambiental y las recientes leyes sobre la protección del medioambiente han generado una atención creciente a los llamados biocompuestos, es decir, a materiales compuestos ecológicos o renovables, obtenidos a partir de biopolímeros reforzados con fibras naturales. Pese la contribución de diversos trabajos publicados en la literatura, centrada en biocompuestos reforzados por fibras de agave, todavía se encuentran en fase de estudio para la implementación de biocompuestos de alto rendimiento para aplicaciones semiestructurales y estructurales [6].

Por otro lado, estudios experimentales de biocompuestos de alto rendimiento a base de resina epoxi reforzados con fibras de agave, así como la implementación sucesiva de modelos micromecánicos confiables que se pueden utilizar en la fase de diseño [7]. Se explica que el uso de estas fibras permite al usuario obtener biocompuestos renovables de alto rendimiento caracterizados por una alta rigidez y resistencia.

METODOLOGÍA

En materia de resistencia mecánica, durante un ensayo de tracción, se debe recordar que la carga aplicada sobre el área de una sección transversal de un cuerpo de prueba se refleja en la tensión a la cual tal cuerpo queda expuesto, y ese parámetro deberá ser constante para el mismo material y para cualquier área de la sección transversal utilizada. Sin embargo, debido a las mayores dificultades operacionales en determinarse valores reales (instantáneos), se convino usar el área inicial para la obtención de la tensión convencional en cualquier punto del ensayo [4]. La figura 2 muestra la relación de carga aplicada en función del área transversal. La misma es directamente proporcional.

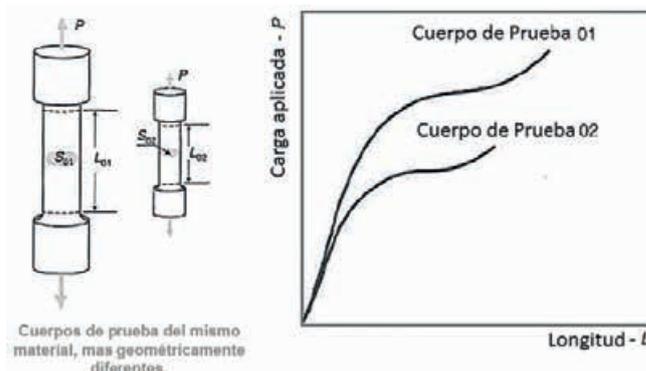


Figura 2. Probetas del mismo material, más geoméricamente diferentes. Las curvas de carga vs. longitud se muestran diferentes.

Fuente: Adaptado de [4].

Sin embargo, el algoritmo para calcular la resistencia convencional es dado por lo siguiente:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

- σ_c : Es la resistencia a la tracción convencional (MPa).
- F : Es la carga aplicada (N).
- A : Es la sección transversal inicial de la probeta.

Ensayos mecánicos en cuerdas fueron reportados bajo el uso de la norma ASTM D2256. Resultados de trabajos para resistencia mecánica en cuerdas lisas de material sintético con diámetro de 5 mm [1] son mostrados en la figura 3. Se observa que la gráfica describe el mecanismo de rotura de la cuerda: aproximadamente a 3,7 kN ocurre la rotura del primer torón. Alrededor de 1,2 kN ocurre la rotura del segundo torón y así sucesivamente si hubiese más torones en la cuerda.

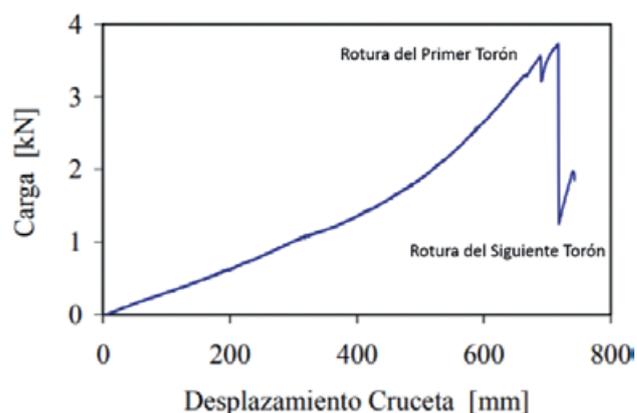


Figura 3. Ensayo de tracción de cuerda sintética.

Fuente: [1].

Para los análisis, fueron utilizados materiales procedentes del puente colgante mostrado en la figura 1 y de la cuerda de agave. La figura 4 muestra las probetas para los ensayos mecánicos de tracción. La muestra de la izquierda corresponde al agave (5 torones) y la muestra de la derecha corresponde a la fibra de ichu (2 torones).



Figura 4. Muestras para ensayo de tracción.
Fuente: Elaboración propia.

Las muestras fueron cortadas en longitudes iguales y se tomó un diámetro promedio en cada torón para calcular la resistencia mecánica convencional. La tabla 1 presenta las dimensiones de las probetas para ser sometidas al ensayo de tracción.

Material	Área transversal promedio (mm ²)	Longitud entre mordazas (mm)
Ichu seco y húmedo	25,12	50
Agave seco y húmedo	29,70	50

Tabla 1. Dimensiones iniciales de las probetas antes del ensayo de tracción.
Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron los ensayos en dos tipos de condiciones: cuerdas secas y húmedas. Estas últimas fueron sumergidas, parcialmente, en agua potable durante 10 minutos [2], con el propósito de simular una situación de humedad extrema. En condiciones normales, un puente colgante en los Andes peruanos está sometido a efectos del clima como la lluvia. Se desea verificar el comportamiento de la cuerda en condiciones semejantes. La figura 5 muestra la preparación de la fibra húmeda antes del ensayo.

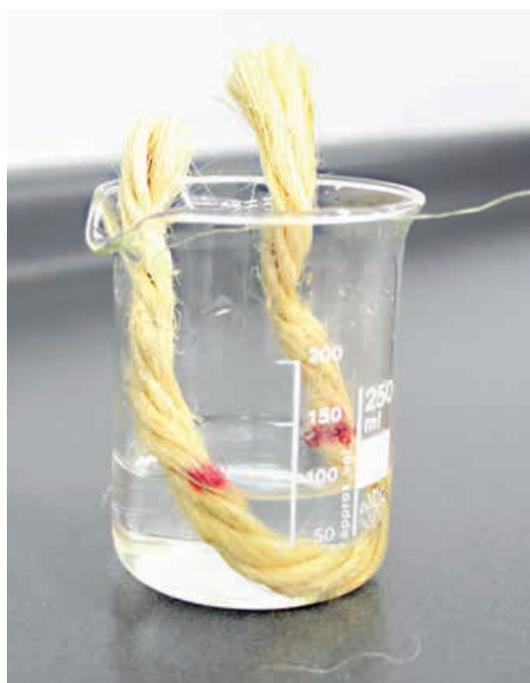
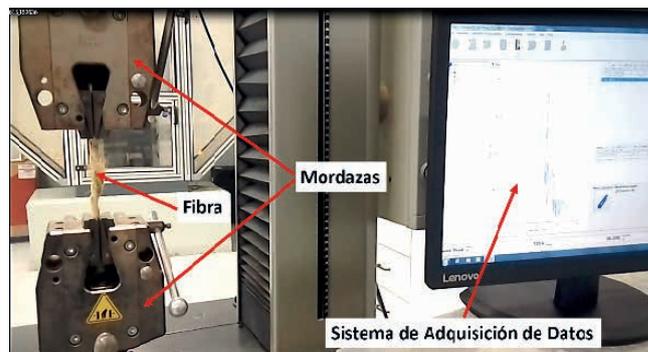
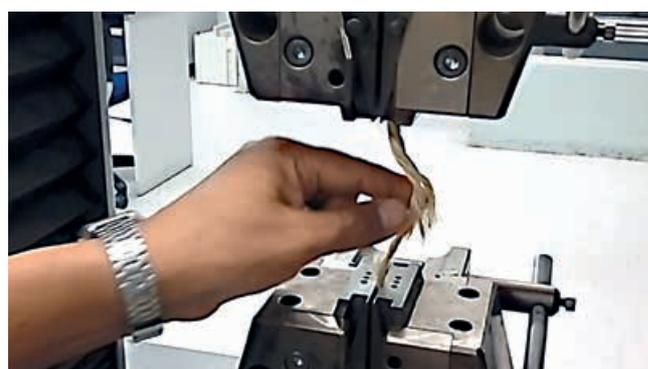


Figura 6. Muestras para ensayo húmedo.
Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Tecsup Sede Centro. Fue utilizada una máquina electromecánica Zwick Roell con capacidad máxima de 50 kN de carga. La figura 6 muestra una probeta *in situ*, en (a) la configuración ensayo, en (b) la fibra luego de la rotura. Los datos fueron adquiridos en el software Text Expert II que acompaña al equipo en mención. La velocidad de ensayo utilizada fue de 150 mm/min. (observando la norma ASTM D2256-02) [7].



(a)



(b)

Figura 5. Ensayo de tracción en fibra.
Fuente: Elaboración propia.

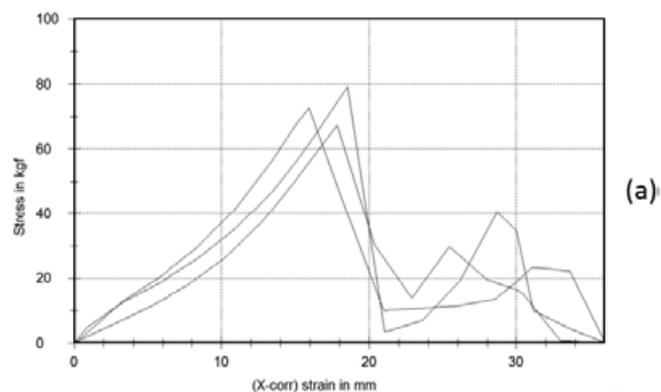
RESULTADOS

A. Ensayos de tracción en ichu

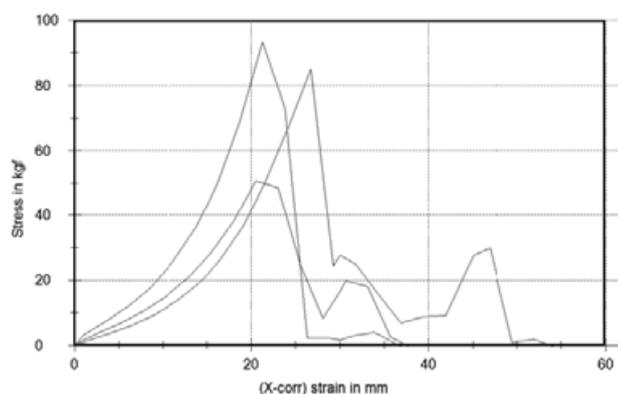
En la figura 6, se muestran las curvas de carga vs. longitud de fibras de ichu. En la figura 6(a), se presentan los resultados de las cuerdas en seco. En la figura 6(b), se muestran los resultados de las fibras húmedas. Se observa que las fibras húmedas presentan un incremento de 22.38 % de la resistencia mecánica en tales condiciones de ensayo.

B. Ensayos de tracción en agave

En la figura 7, se muestran las curvas de carga vs. longitud de cuerdas de agave. En la figura 7(a), se presentan los resultados de las cuerdas es seco. En la figura 7(b), se muestran los resultados de las cuerdas húmedas. Se observa que las últimas presentan una reducción de 25.89 % de la resistencia mecánica en tales condiciones de ensayo.

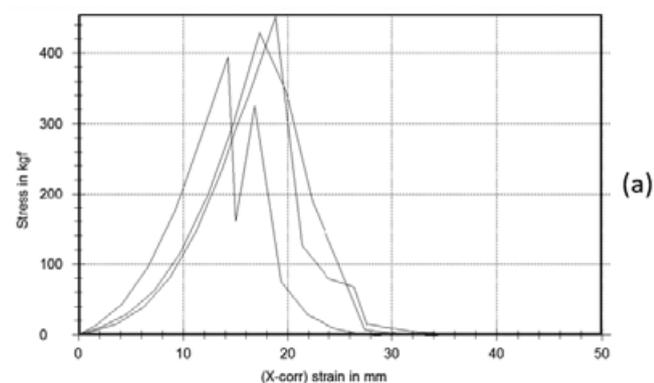


(a)

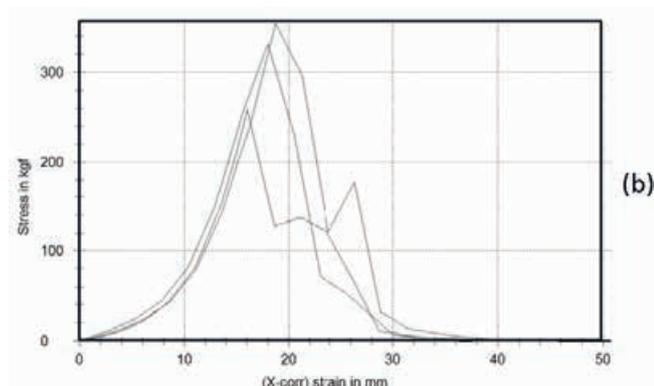


(b)

Figura 6. Resultados del ensayo de tracción en fibras de ichu.
Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 7. Resultados del ensayo de tracción en fibras de agave.
Fuente: Elaboración propia.

C. Resistencia mecánica

La tabla 2 muestra los valores de resistencia mecánica calculados (Resultados por cada muestra y el promedio). Como las fibras de ichu y de agave poseen diferentes áreas, se estipula presentar los resultados como máxima resistencia a la tracción.

Material	Seco (MPa)	Promedio (MPa)	Húmedo (MPa)	Promedio (MPa)
Ichu	30,93	28,48	33,23	34,01
	28,29		36,48	
	26,23		32,33	
Agave	148,86	140,20	85,30	103,91
	130,17		116,80	
	141,64		109,65	

Tabla 2. Resistencia mecánica de las fibras ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

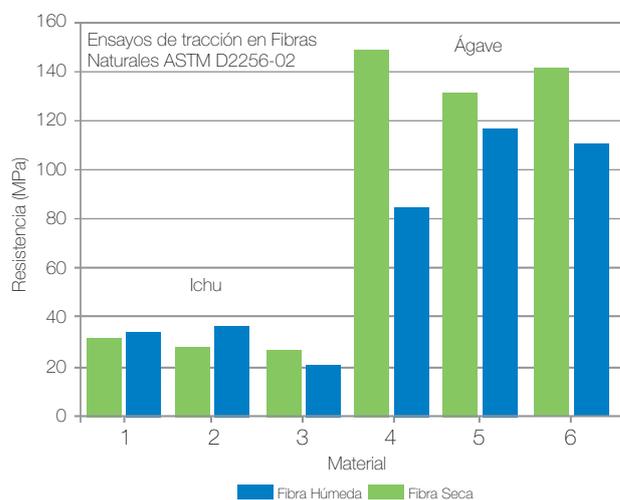


Figura 8. Correlación entre el efecto de la humedad y la resistencia mecánica.

Fuente: Elaboración propia.

D. Humedad en las muestras

La masa de agua que fue absorbida tanto por las cuerdas de agave como ichu se observa en la tabla 3. Se midió la masa de las muestras antes y después del contacto con el agua durante 10 minutos conforme fue mostrado en la figura 5.

Material	Seco (gramos)	Húmedo (gramos)	Aumento (%)	Promedio (%)
Ichu (2 torones)	4,50	9,10	49,45	48,61
	5,12	10,23	50,04	
	4,69	10,11	46,38	
Agave (5 torones)	5,97	13,08	45,64	45,12
	6,60	14,94	44,17	
	6,32	13,87	45,56	

Tabla 3. Masa en gramos de las fibras ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Las cuerdas de agave presentaron mayor resistencia mecánica, tanto secas como húmedas, al ser traccionadas en comparación a las fibras de ichu.
- La humedad disminuye la resistencia de las cuerdas de agave. Dependerá también del porcentaje de humedad contenido en las fibras. Por otro lado, la humedad incrementa la resistencia de las cuerdas de ichu. Se observa un incremento de 46,8 % en aumento de masa como promedio en todas las cuerdas ensayadas.
- Es necesario evaluar la cuerda de agave expuesta a la intemperie. De esa manera se podrán comparar los resultados con los obtenidos en cuerdas de ichu, pues el puente colgante ha soportado los efectos del sol, la lluvia, el viento, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] Aldazabal, J. (2007). Resistencia a tracción de cuerdas anudadas. *Anales de la Mecánica de Fractura*, 2, 563- 566.
- [2] ASTM Standard D2256. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. American Society for Testing and Materials.
- [3] Charca, S. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 118. 55-60.
- [4] Garcia, A., Spim, J., y Santos, C. A. (2012). *Ensaio dos Materiais*. (2ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- [5] Hyslop, J. (2010). *Qhapac Ñan: El Sistema Vial Incaico*. (2ª ed.). Lima: Petróleos del Perú.
- [6] Zuccarello, B. (2017). Toward high performance renewable agave reinforced biocomposites: Optimization of fiber performance and fiber-matrix adhesion analysis. *Composites Part B: Engineering*, 122. 109-120.
- [7] Zuccarello, B. (2017). Experimental analysis and micromechanical models of high performance renewable agave reinforced biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119. 141-152.

AGRADECIMIENTOS

Al Arquitecto Walter Gonzales Arnao, docente investigador de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Ingeniería, quien nos motivo a realizar este estudio de las cuerdas del modelo de puente colgante que mando

a elaborar en el marco del proyecto IGI-UNI, «Instalación de puente colgante con tecnología digital» y al Ingeniero César Cruz Gutiérrez, docente investigador de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres quien nos proporcionó datos sobre el proceso tradicional de tejido realizado por los artesanos tejedores del distrito de Quehue, provincia de Canas, Cuzco.

ACERCA DE LOS AUTORES

César R. Nunura

Es doctor en Ingeniería y Tecnología de Materiales por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur (PUCRS, Brasil). Posee maestría en Ingeniería de Procesos de Fabricación por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, Brasil). Es graduado en Ingeniería Mecánica titulado por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur (PUCRS, Brasil). Tiene experiencia en el área de análisis numérico en transferencia de calor, ciencia de los materiales y metalurgia física. Actualmente, es profesor de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).

@ cnunura@utec.edu.pe

César Lecaros

Posee estudios de maestría en Ingeniería y Ciencias de los Materiales por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Es ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Ingeniería, con una especialización en Materiales de Ingeniería. Tiene una especialización en Automatización de la Producción en Senai (Brasil). Es especialista en metrología, para lo cual ha seguido capacitaciones en México y Brasil. Forma parte de la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).

@ clecaros@tecsup.edu.pe

Sixto Roberto Delgado Valdivia

Ingeniero electrónico egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Comenzó su carrera profesional en ITINTEC como ingeniero de diseño en proyectos de investigación de tecnología industrial y también como evaluador de patentes de invención. Más tarde, asumió funciones como supervisor de proyectos de investigación, presidente del Comité de Normalización y jefe de la oficina de ingeniería del departamento de Electrónica de ITINTEC. Trabajó en Entel Perú y empresas privadas en la implementación de proyectos de telecomunicaciones e implementación de laboratorios y talleres para la construcción de equipos electrónicos. Actualmente, es coordinador de Fab Lab Tecsup y coordinador de la carrera de Diseño Industrial en Tecsup. Graduado del diploma de la Academia FAB en el año 2012, es instructor, evaluador global y mentor de la Academia Fab.

@ rdelgado@tecsup.edu.pe

El desarrollo tecnológico incluye un *software* que permite reenviar la información y presentar **estadísticas** respecto a los eventos o capturas que suceden durante el año.



Sistema electrónico de alerta y captura de roedores para el sector agroindustrial

Alert and Capture of Rodents Electronic System for the Agro-Industrial Sector

RESUMEN

En el Perú, el control de roedores requiere mucho tiempo y esfuerzo del controlador de plagas. Una empresa agroindustrial coloca entre 50 y 200 dispositivos, que se verifican periódicamente. A veces, se encuentran roedores en estado de putrefacción con alto riesgo de contaminación.

El objetivo es desarrollar un método de desratización permanente (24 horas / 7 días) que reemplace a la desratización «tradicional».

Por ello se desarrolló un sistema de control inteligente, que envía alertas ante la presencia o la captura de un roedor en los dispositivos, sea mediante un mensaje de texto o correo electrónico, lo que permite una rápida intervención; asimismo se cuenta con un software que registra todas las capturas y eventos en los dispositivos.

El proyecto se desarrolló desde marzo hasta diciembre de 2017. En la fase de laboratorio, se diseñaron y ensamblaron los prototipos 1, 2 y 3, posteriormente, se incluyó el prototipo 4, importado, para comparación con los anteriores. Las pruebas se hicieron en la empresa Control S. A. C., en La Victoria, Lima. Los prototipos con mayor eficacia en el envío de las comunicaciones fueron los prototipos 1 y 4 con un 100 % y 95.76 % de eficacia, respectivamente.

Los prototipos seleccionados pasaron a la fase de campo que se realizó en tres empresas del sector agroindustrial, ubicadas en el Callao y Lurín. La eficacia promedio de los prototipos 1 y 4 fueron de 88.31 % y 90.53 %, respectivamente.

El análisis económico demostró que el prototipo 1 resultó ser 24.3 % más económico que el prototipo 4. Ambos presentaron mayor viabilidad comercial para el mercado nacional, teniéndose en cuenta que el primero trabaja con red WiFi, mientras que el segundo con mensajería de texto (alternancia en el portafolio comercial de la empresa).

Durante la ejecución del proyecto, se logró un monitoreo continuo para el control de roedores (24 horas / 7 días).

ABSTRACT

In Peru, rodent control requires a lot of time and effort from the pest controller. An agro-industrial company puts in place between 50 to 200 devices, which are checked periodically. Sometimes rodents are found in a state of putrefaction with a high risk of contamination.

The objective is to develop a permanent rat extermination method (24 hours / 7 days) in substitution of the «traditional» method.

For this reason, a smart control system was developed, which sends alerts to the presence or capture of a rodent in the devices, either by means of a text message or email message, allowing a quick intervention; it counts on also with a software package that records all the captures and events in the devices.

The project was developed from March to December 2017. In the laboratory phase, the prototypes 1, 2 and 3 were designed and assembled; later a prototype 4, imported, was included for comparison purposes with the previous ones. The tests were carried out at Control SAC., in La Victoria, Lima. Prototypes with the highest efficiency in sending communications were prototype 1 and 4 with 100% and 95.76% efficiency, respectively.

The selected prototypes went to the field phase, which was carried out in three companies of the agro-industrial sector, located in Callao and Lurin. The average efficiency of prototypes 1 and 4 were 88.31% and 90.53%, respectively.

The economic analysis showed us that prototype 1 turned out to be 24.3% cheaper than prototype 4. Both prototypes showed greater commercial viability for the local market, taking into account that the first works with a WiFi network, while the second with text messaging (alternation in the commercial portfolio of the company).

During the developing of the project, it was achieved a continuous monitoring for the control of rodents (24 hours / 7 days).



Palabras clave

Sensores, plagas, industria, sistema electrónico, roedores, WiFi, software.

Key words

Sensors, pests, industry, electronic system, rodents, WiFi, software.

INTRODUCCIÓN

La presencia de roedores en la agroindustria pone en riesgo la calidad e inocuidad de los alimentos y sus envases generando grandes pérdidas económicas y daños a la salud de los consumidores [14]. Actualmente, en el Perú, las empresas controladoras de plagas realizan el servicio de desratización «tradicional», empleando un alto número de personal y tiempo [6].

Se han determinado varios impactos negativos como son los problemas dorsales en las personas que revisan los cebaderos (al ser ubicados siempre sobre los pisos), además de problemas en la piel por exposición a los rayos solares y el riesgo biológico por exposición al encontrar un roedor en proceso de putrefacción. Esto último representa también un riesgo sobre las instalaciones y los alimentos que se producen. Desde el punto de vista económico y de la productividad, se tiene un alto costo horas-hombre al desratizar con el método «tradicional» que consiste en la revisión uno a uno de los cebaderos instalados [16]. Normalmente, esta actividad se realiza cada semana, quincena, al mes o hasta trimestralmente, según el grado de infestación y las posibilidades económicas de la empresa afectada.

El objetivo del proyecto es, por tanto, encontrar un método de desratización permanente (las 24 horas, todo el año) que pueda reemplazar a la desratización «tradicional» por ser esta periódica y parcialmente eficaz.

Control S. A. C. logró desarrollar un sistema de alerta y captura de roedores mediante el uso de sensores de movimiento, al cual le hemos denominado *Smart Control System*.

A través de este nuevo sistema, se reemplazará la metodología «tradicional» de desratización por una nueva que consiste en adaptar a los cebaderos de desratización unos componentes electrónicos que envían alertas de captura en tiempo real, vía SMS o correo electrónico al controlador de plagas o destinatario interesado. El desarrollo tecnológico incluye un *software* que permita reenviar la información y presentar estadísticas respecto a los eventos o capturas que sucedan durante el año.

Con este nuevo sistema, desarrollado en el país, las empresas tendrán un monitoreo continuo de los cebaderos y una atención inmediata del controlador de plagas ante cualquier alerta de captura recibida, reduciéndose el riesgo biológico de contaminación por roedores.

FUNDAMENTOS

A nivel internacional, en los últimos tres años se han desarrollado sistemas tecnológicos para el control de actividad de roedores en la industria que permitan evitar daños ocasionados por estas plagas. Sin embargo, en el Perú, aún no se ha elaborado una tecnología eficaz que permita detectar la presencia de los roedores, su captura y eliminación.

Según Gartner, durante el 2016 se incrementó en un 39 % el número de dispositivos conectados a internet de las cosas (Internet of Things - IoT); es decir, esta cifra supone un aumento de más de 500 millones de dispositivos en relación con el

año anterior, 2015 [10]. Respecto al control de roedores con sistemas IoT, ya es posible encontrar en el mundo dispositivos electrónicos para estos fines, aunque estos aún representan un altísimo costo al querer importarlos e implementarlos en nuestro país.

En Argentina, se desarrolló una herramienta de *software* donde, a través de información extraída de imágenes satelitales, se estudia el comportamiento de roedores [2].

En España, se aplica el servicio de Desratización Inteligente, que consiste en el desarrollo de trampas electrónicas con sistema de monitoreo en tiempo real [2].

Wisecan, por su parte, desarrolló una trampa inteligente para la captura múltiple de ratas. Este dispositivo puede estar conectado a un *software* que avisa, mediante un mensaje de texto o correo, electrónico cuando un roedor es capturado [17].

Rentokil desarrolló un sistema RADAR que detecta, captura y aísla a los roedores. Además, envía un aviso mediante correo electrónico o mensaje de texto cuando el roedor es capturado dentro del dispositivo [15].

El sistema de alerta y captura de roedores *Smart Control System*, desarrollado por Control S. A. C., es de última tecnología e innovador en nuestro país, de monitoreo continuo para el control de roedores. Los sensores se adaptarán a los cebaderos que, normalmente, se emplean para desratizar en las empresas. El responsable del control de plagas tendrá el control *online* de los cebaderos instalados.

El sistema *Smart Control System* está conectado a un *software* donde se registrarán todos los eventos y alertas de captura con la finalidad de realizar el análisis estadístico de los datos.

Se desarrollaron cuatro prototipos que se instalaron en los cebaderos que se emplean normalmente para el control de roedores.

Prototipo 1 (PRT1): Compuesto de una placa electrónica con módulo WiFi ESP8266 y un sensor PIR de movimiento [9], [12]. Para su funcionamiento, se requiere una conexión a red. La parte electrónica está adaptada al exterior del cebadero. Cuando un roedor ingresa al cebadero, es capturado por una trampa pegante y el movimiento del roedor es detectado por el sensor, el cual activa el módulo WiFi y envía la alerta a la base de datos del *software* desarrollado.



Figura 1. Cebadero con trampa adherente para prototipos PRT1, PRT2 y PRT3. Fuente: Elaboración propia.

Prototipo 2 (PRT2): Tiene comunicación vía SMS. Este prototipo, al detectar el movimiento mediante el sensor PIR, envía la información al módulo de comunicación que tiene insertado un chip de telefonía móvil, el cual enviará un SMS con alerta de captura a un celular programado. El módulo de comunicación de este prototipo es el dispositivo SIM 800L [18], y el microcontrolador ATmega 328P [3].

Prototipo 3 (PRT3): Tiene comunicación vía SMS. Este prototipo, al detectar el movimiento mediante el sensor PIR, envía la información al módulo de procesamiento quien da la orden al módulo de comunicación para que envíe un SMS con alerta de captura al número celular programado. Al igual que el prototipo 2, la placa electrónica tiene insertado un chip que envía un SMS al controlador de plagas.

El módulo de comunicación de este prototipo es el dispositivo SIM 900L [19], y el de procesamiento el microcontrolador del dispositivo Arduino UNO.

Prototipo 4 (PRT4): Es un prototipo adicional ensamblado, procedente de China (Figura 2), y que tiene la misma funcionalidad que los diseñados para este proyecto en nuestro país. Tiene comunicación vía SMS y un sensor de golpe que al activarse envía la información de captura al controlador de plagas.



Figura 2. Prototipo PRT4.
Fuente: Elaboración propia.

El PRT4 se instaló dentro de un cebadero como el de la figura 3.



Figura 3. Cebadero con trampa de golpe para prototipo PRT4.
Fuente: Elaboración propia.

El principal riesgo tecnológico detectado que se debe superar es la calidad de la señal en la recepción por parte de los emisores. Una buena cobertura de señal de telefonía es indispensable para el funcionamiento del sistema en general, así como la ubicación de los cebaderos y el nivel de interferencias que se podrían encontrar, los cuales serán limitaciones que deben ser detectadas y superadas.

METODOLOGÍA

La presente investigación consistió en dos fases: la primera, denominada *fase de laboratorio*, realizada en nuestras instalaciones y una segunda, *fase de campo*, ejecutada en las instalaciones de tres empresas agroindustriales elegidas.

Las principales variables en estudio fueron el lugar de ubicación de cebaderos, el nivel de cobertura e intensidad de señal de operadoras de telefonía, la fuente de energía de los prototipos (baterías), la calidad de ensamblaje y la calidad en el envío de alertas.

A. Fase de laboratorio

A.1. Diseño y formulación técnica de los prototipos

Se realizó el diseño electrónico de tres prototipos de sistema de alerta y captura de roedores: uno de conexión WiFi (PRT1) y otros de conexiones SMS (PRT2 y PRT3).

A.2. Ensamblaje de prototipos de sistema de alerta y captura de roedores

Se ensambló cinco ejemplares de cada prototipo diseñado: PRT1, PRT2 y PRT3, para dar inicio a las pruebas de funcionamiento iniciales.

En esta etapa, se adquirió un prototipo desarrollado en el exterior (PRT4) con la finalidad de efectuar la comparación respecto a la eficacia en el funcionamiento frente a los prototipos desarrollados en el país.

La tecnología de este equipo consiste en el envío de SMS al activarse el sensor de golpe como consecuencia de la activación de una trampa de gatillo para captura de un roedor.

A.3. Desarrollo de software (inicial)

Se dio inicio al desarrollo del *software* según los requerimientos establecidos por el equipo técnico del proyecto (Figuras 4 y 5). Para ello se realizó la contratación de personal externo especializado.



Figura 4. Software inicial de proyecto (usado en fase de laboratorio).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Software final SmartControl (usado en fase de campo).
Fuente: Elaboración propia.

A.4. Prueba de conectividad con software inicial

Se realizaron pruebas de conexión entre el software y los prototipos para asegurarse el envío de las alertas y su registro en la base de datos desarrollada.

A.5. Prueba de funcionamiento en instalaciones de Control S. A. C.

Las pruebas de funcionamiento de los cuatro prototipos se realizaron en distintas ubicaciones del edificio de cinco pisos, propiedad de la empresa Control S. A. C., ubicado en Santa Catalina, distrito de La Victoria: sótano, azotea (Figura 6) y pisos intermedios. Las pruebas se realizaron por un periodo de tres meses. La metodología consistió en activar alertas manualmente y de manera diaria (5 días por semana / 2 veces al día) y verificar si las alertas son recepcionadas por el software (base de datos inicial). Se registraron datos como tiempo de demora del envío de alertas luego de la activación, recepción de alertas en software, entre otros.

El funcionamiento y la eficacia de los 4 prototipos evaluados estuvieron sujetos a variables como la ubicación y la cobertura de señal en la zona, las cuales fueron analizadas en esta etapa.



Figura 6. Prueba en instalaciones de Control S. A. C. (Azotea).
Fuente: Elaboración propia.

A.6. Evaluación y selección de prototipos para la fase de campo

Una vez culminado el periodo de prueba en las instalaciones de Control S. A. C., se procedió al análisis de los resultados y se determinó la eficacia en el funcionamiento de los cuatro prototipos evaluados. Además del análisis técnico, se realizó un análisis de costos y beneficios, con la finalidad de determinar la viabilidad comercial del producto. Luego del análisis, se procedió a la selección de los mejores prototipos (alta eficacia y bajo costo) para que sean evaluados en la fase de campo.

B. Fase de campo

B.1. Ensamblaje de prototipos seleccionados

Los prototipos seleccionados fueron replicados (total: 60 dispositivos). Durante esta etapa, también se realizaron mejoras de diseño de los prototipos seleccionados para un mejor funcionamiento y ahorro de energía.

B.2. Instalación de dispositivos electrónicos en empresas agroindustriales

Para las pruebas de campo se seleccionaron tres empresas agroindustriales: dos ubicadas en el distrito de Lurín y una en el Callao, donde se realizaron las pruebas de campo por un periodo de dos meses.

B.3. Monitoreo y seguimiento de captura de roedores por el sistema

Se realizaron monitoreos 2 a 3 veces por semana, por un periodo de 2 meses, y se activaron manualmente las alertas con la finalidad de verificar la operatividad del sistema.

B.4. Mejora de atributos de software desarrollado

Durante el periodo de prueba de monitoreo en campo, se realizaron modificaciones al software para su mejora según las necesidades encontradas.

B.5. Estudio de factibilidad comercial de prototipos validados. Análisis de costo-beneficio

Luego del periodo de prueba de campo se analizaron los resultados técnicos de los prototipos y se determinó su operatividad y eficiencia. Asimismo se realizó un análisis de costo beneficio para determinar la viabilidad del proyecto.

RESULTADOS

A. Fase de laboratorio: Prueba en instalaciones de Control S. A. C.

Funcionamiento PRT1

Para el funcionamiento del prototipo PRT₁ se debe contar con conexión a una red. Los prototipos desarrollados fueron instalados en un área con cobertura WiFi y se determinó que el 100 % de las alarmas activadas fueron recibidas y almacenadas en el software inicial del proyecto (Tabla 1). No se tuvieron inconvenientes de fallas en cobertura de señal WiFi durante el

periodo de prueba. La eficacia de funcionamiento de las cinco réplicas diseñadas fue de 100 % en el envío de alertas.

Ubicación	Recepción de alerta en software
4.º piso	100.00 %
5.º piso	100.00 %

Tabla 1. Eficacia en el envío de alertas - PRT1.
Fuente: Elaboración propia.

No se presentaron problemas al momento de activar el sensor y se determinó que el tiempo promedio de detección de movimiento por parte del sensor correspondió a 13 segundos.

Funcionamiento PRT2

Se determinó un 26.69 % de eficacia promedio en el envío de las alertas a la base de datos.

Variable: Ubicación

Los resultados específicos, según las ubicaciones de las pruebas, fueron los siguientes:

Ubicación	Recepción de alerta	
	Falla	Éxito
Azotea	64.29 %	35.71 %
Sótano	81.82 %	18.18 %
4º piso	73.81 %	26.19 %
Promedio	73.31 %	26.69 %

Tabla 2. Eficacia PRT2 según ubicación para los operadores Entel, Claro y Movistar.
Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que el sótano es la ubicación con menor porcentaje de envío y recepción de alertas. Principalmente, por la interferencia de la señal de telefonía en esa zona.

Por otro lado, la azotea presentó un mayor número de alertas recibidas en comparación con el sótano y 4º piso, como consecuencia de las características del lugar, lugar abierto, sin obstáculos, alta intensidad de señal para operadoras de telefonía (Tabla 2).

Sin embargo, es importante mencionar que este prototipo, además de presentar un bajo número de envío de alertas, es el que presenta fallas en el *hardware*, por motivos de ensamblaje.

Variable: Operadora de telefonía

La operadora Entel obtuvo un mayor porcentaje de alertas detectadas (Figura 7). El resultado puede variar respecto a otros lugares ya que depende de la potencia de la señal celular.

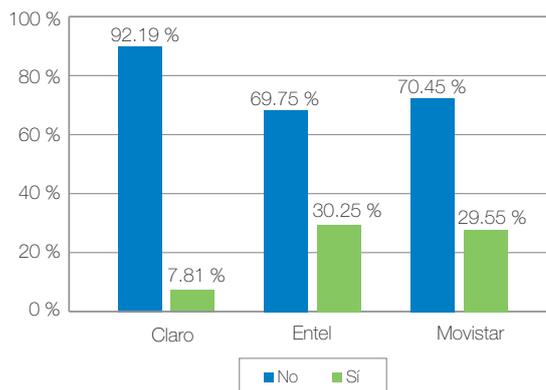


Figura 7. Eficacia PRT2 según operadora de telefonía.
Fuente: Elaboración propia.

Variable: Tiempo demora de envío de SMS

En la mayoría de los casos, el mensaje llegó luego de 1 minuto, incluso llegando a demorar 30 minutos como máximo.

Funcionamiento PRT3

Se detectó que la eficacia promedio en el envío de alertas fue de 71.05 %.

Variable: Ubicación

Se determinó que, en el sótano, existe menor porcentaje de alertas detectadas, mientras que en la azotea es mayor. Esto se debe a que la señal celular tiene débil cobertura en el primero (Tabla 3).

Ubicación	Recepción de alerta	
	Falla	Éxito
Azotea	12.50 %	87.50 %
Sótano	49.52 %	50.48 %
4º piso	24.82 %	75.18 %
Promedio	28.95 %	71.05 %

Tabla 3. Eficacia PRT3 según ubicación para los operadores Entel, Claro y Movistar.
Fuente: Elaboración propia.

Variable: Operadora de telefonía

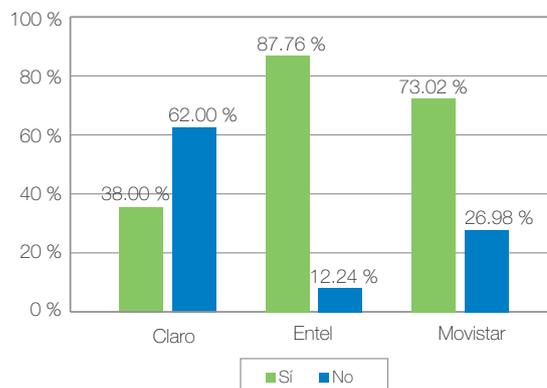


Figura 8. Eficacia PRT3 según operadora de telefonía.
Fuente: Elaboración propia.

Los prototipos PRT3 con chip Entel y Movistar presentaron un mayor porcentaje de envío de alertas, con respecto a la operadora Claro (Figura 8). Esto se debe a una mejor cobertura de señal en la zona de estudio (La Victoria, Lima).

Variable: Tiempo demora de envío de SMS

Se determinó que el tiempo de demora de envío de alerta, luego de activarse el sensor de movimiento es de 30 segundos en la mayoría de los datos tomados.

Funcionamiento PRT4

Para el caso del prototipo 4 (PRT4), el 75.43 % de los cebaderos enviaron la alerta luego de su activación, mientras que el 24.57 % no tuvo éxito como consecuencia de la falta de cobertura en la señal telefónica principalmente en el sótano.

Ubicación	Recepción de alerta	
	No	Sí
Azotea	3.33 %	96.67 %
Sótano	63.13 %	36.88 %
4° piso	7.24 %	92.76 %
Promedio	24.57 %	75.43 %

Tabla 4. Eficacia PRT4 según ubicación para los operadores Entel, Claro y Movistar.
Fuente: Elaboración propia.

Variable: Ubicación

En la tabla 4, se observa el resultado de eficacia de alerta según ubicación de prototipo. En el sótano, existe un menor porcentaje de alertas detectadas, mientras que en la azotea y en el 4° piso es mayor. Esto se debe a que en el sótano la señal de la comunicación celular no llega con buena potencia.

Ubicación	PRT1	PRT2			PRT3			PRT4		
	WiFi	Entel	Claro	Movistar	Entel	Claro	Movistar	Entel	Claro	Movistar
4° piso	100 %	33.33 %	8.05 %	18.18 %	88.24 %	51.85 %	93.75 %	96.10 %	90.12 %	98.36 %
Azotea	-	55.56 %	20.00 %	22.22 %	83.33 %	80.00 %	100.00 %	100.00 %	100.00 %	90.00 %
Promedio por operadora	100 %	44.44 %	14.02 %	20.20 %	85.78 %	65.93 %	96.88 %	98.05 %	95.06 %	94.18 %
Promedio de eficacia (%)	100 %	26.22 %			82.86 %			95.76 %		

Tabla 5. Eficacia comparativa (resumen) según ubicación y operadora de telefonía.
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se descartaron las mediciones del sótano por la baja señal de cobertura telefónica.

El prototipo con mejor eficacia es PRT1 con un 100 % de envío de las alertas activadas a la base de datos, seguido de PRT4 con un 95.76 % de eficacia en envíos de alerta exitosas.

Variable: Operadora de telefonía

Para el caso del prototipo PRT4, la señal de telefonía Entel es la que presenta mayor porcentaje de envío exitoso de alertas (95.61 %) con respecto a las demás operadoras (Figura 9). Esto se debe a una mejor cobertura de señal en la zona y en ubicaciones con interferencias como el sótano.

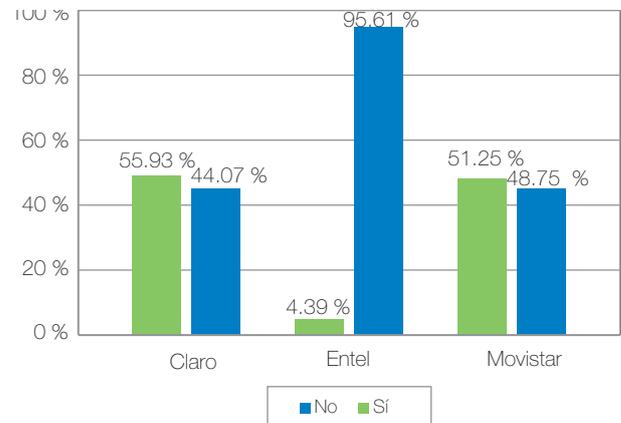


Figura 9. Eficacia PRT 4 según operadora de telefonía.
Fuente: Elaboración propia.

Variable: Tiempo demora de envío de SMS

El tiempo promedio en enviar las alertas al celular receptor y base de datos luego de activada la alerta se encuentra entre los 21 y 30 segundos.

Análisis de eficacia comparativa de prototipos

Las eficacias se analizaron comparativamente en función a las ubicaciones, donde se desarrollaron las pruebas, y las operadoras de telefonía en prueba (Tabla 5). Se decidió que los datos obtenidos en el sótano del edificio no serían comprendidos en los datos estadísticos debido a que generarían errores estadísticos en los resultados.

Análisis técnico económico

A continuación, se muestra un cuadro resumen (Tabla 6) del comportamiento de los 4 prototipos, en función a los ciertos criterios evaluados:

N.º DE PROTOTIPO	ENSAMBLAJE				FUNCIONALIDAD	RIESGO FALLA	COSTO					CALIFICACIÓN FINAL	
	RAPIDEZ	FACILIDAD	FALLAS	TOTAL	1.CALIFICACIÓN	2.% EFICACIA	3.OPERACIÓN	4. ENSAMBLAJE	5. INSTALACIÓN	6. OPERACIÓN	7. REPARACIÓN		8. MATERIALES
PRT1 (Corriente - Wifi)	4	4	2	10	MALO	100.00 %	BAJO	10	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	APTO
PRT2 (Corriente - GSM)	3	3	4	10	MALO	26.22 %	MEDIO	10	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	NO APTO
PRT3 (Corriente - GSM)	2	2	4	8	BUENO	82.86 %	MEDIO	8	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	NO APTO
PRT4 (Batería- GSM)	1	1	1	3	BUENO	95.76 %	BAJO	3	BAJO	BAJO	ALTO	MEDIO	APTO

Tabla 6. resultados de evaluación técnico-económica (fase laboratorio). **Fuente:** Elaboración propia.
Nota: Se consideran como «ACIERTOS» a las calificaciones en fondo azul y letras blancas.

Del cuadro resumen, sobre la base de ocho aspectos evaluados, se obtuvieron los siguientes resultados:

- PRT-1: Obtuvo 5 aciertos, calificándose como **APTO**.
- PRT-2: Obtuvo 0 aciertos, calificándose como **NO APTO**.
- PRT-3: Obtuvo 1 acierto, calificándose como **NO APTO**.
- PRT-4: Obtuvo 6 aciertos, calificándose como **APTO**.

Con base en los resultados obtenido, no existe diferencia significativa entre el prototipo PRT1 y PRT4, por lo que son seleccionado para la fase de prueba de campo.

Incidencias en la fase de laboratorio

Durante esta fase, se descartó a la operadora Bitel como opción para la prueba por no contar con red 2G (SMS), necesaria para su adaptación a los prototipos.

Fase de campo

Ensamblado de prototipos

Para las pruebas de campo, se ensamblaron 30 dispositivos PRT1, como se observa en la figura 15. Para el caso del prototipo PRT4 se adquirieron 30 de estos sistemas.

Instalación de prototipos en empresas agroindustriales

Los prototipos seleccionados fueron instalados en tres empresas agroindustriales ubicadas en Callao (Figura 10) y Lurín (Figuras 11 y 12). Durante esta etapa, se activaron las alertas para verificar el funcionamiento de los prototipos (Figura 13).



Figura 10. Instalación de prototipos en Callao.
Fuente: Elaboración propia.



Figuras 11 y 12. Instalación de prototipos en Lurín.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Monitoreo de cebaderos en Lurín.
Fuente: Elaboración propia.

Durante la fase de prueba de campo, se analizaron los siguientes ítems:

Operatividad de los prototipos

La operatividad promedio, en las tres empresas evaluadas, se muestran en la tabla 7.

Prototipo	Operatividad	
	Activo	Inactivo
PRT1-WIFI	93.82 %	6.19 %
PRT4-SMS	97.31 %	2.69 %

Tabla 7. Operatividad PRT1 vs. PRT4.
Fuente: Elaboración propia.

El prototipo PRT4 presentó un porcentaje mayor de operatividad que el prototipo PRT1. La operatividad tuvo relación directa con la fuente de energía instalada en cada prototipo.

El PRT1 presentó mayores fallas debido a la batería alcalina que usa, en comparación con la batería de litio empleada en PRT4.

Eficacia de prototipos (alertas registradas en software)

El prototipo PRT4 presentó un mayor porcentaje de alertas registradas en software (90.53 %), mientras que PRT1 un porcentaje ligeramente menor (88.31 %). Esto debido, principalmente, a fallas o pérdidas de la red WiFi en las zonas de monitoreo (Tabla 8). Las alertas exitosas corresponden a

aquellas que fueron enviadas y registradas en el software *Smart Control System*.

Ubicación	% de éxito de PRT1 (alertas registradas)	% de éxito de PRT4 (alertas registradas)
Lurín	92.59 %	88.0 %
Callao	84.02 %	93.06 %
Promedio	88.31 %	90.53 %

Tabla 8. Alertas exitosas (PRT1 y PRT4).
Fuente: Elaboración propia.

La ubicación donde se obtuvo una mayor cantidad de alertas exitosas fue el distrito de Lurín para el caso de PRT1, mientras que, en el Callao, se obtuvo un mayor porcentaje de alertas exitosas para el prototipo PRT4.

Captura de roedores durante la fase de campo.

En esta fase, se produjo una captura en el prototipo PRT1 ubicada en una empresa del distrito de Lurín (Tabla 9). En las demás ubicaciones donde se realizaron las pruebas, no se registró la captura debido a la ausencia de estos animales.

Prototipo	Ubicación	Capturas
PRT1	Lurín	1
	Callao	0
PRT4	Lurín	0
	Callao	0

Tabla 9. Capturas PRT1 vs. PRT4.
Fuente: Elaboración propia.

El roedor fue atrapado en una trampa pegante en una de las visitas del mes de noviembre. Se acudió gracias a la respuesta del software *Smart Control System*.

Incidencias en la fase de campo

Durante la prueba, se registraron falsas alertas debido a golpes accidentales a los dispositivos por el personal o maquinarias.

Análisis técnico y económico de PRT1 y PRT4

Se analizaron cuatro aspectos de importancia en los prototipos que podrían determinar su viabilidad comercial en el mercado nacional. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

N.º DE PROTOTIPO	1	2		3	4				
	RAPIDEZ EN EL ENSAMBLAJE	EFICACIA Y FUNCIONALIDAD			RIESGO DE FALLAS	COSTOS (PARA 20 DISPOSITIVOS)			
		% Operatividad (por batería)	% Alarmas enviadas por el prototipo	% de Éxito (Alarmas registradas en software)	OPERACIÓN	ENSAMBLAJE Y MATERIALES (20 dispositivos)	PASAJES Y VIATICOS DESRATIZADOR (1 VISITA MENSUAL)	CONSUMIBLES MENSUAL (pilas, recargas de chips, etc.)	MANTO ANUAL /REPARACIÓN
PRT1 (WiFi)	LENTO	93.82 %	73.62 %	88.31 %	BAJO	S/ 5 008.20	S/ 103.70	S/ 279.00	S/ 83.50
PRT4 (GSM)	RÁPIDO	97.31 %	83.92 %	90.53 %	BAJO	S/ 6 746.40	S/ 103.70	S/ 325.00	S/ 93.30

Tabla 10. Resultados de evaluación técnico-económica (fase campo).
Fuente: Elaboración propia.

El prototipo PRT1 presentó mayores problemas en el ensamblaje debido a la dificultad en la soldadura de piezas pequeñas. La eficacia de PRT1 fue menor que PRT4, debido a las condiciones externas al desarrollo del *hardware*: baja cobertura e intermitencia en la señal WiFi disponible, entre otros, a diferencia de la fase de laboratorio donde el prototipo PRT1 (WiFi) presentó 100 % de eficacia. El PRT1 presentó menor costo de ensamblaje y puesta en funcionamiento lo cual representa una mayor utilidad.

Con base en la eficacia y factibilidad comercial, se determinó que los prototipos PRT1 y PRT4 presentaron mayor viabilidad comercial para el mercado nacional.

CONCLUSIONES

- Se cumplieron los objetivos establecidos para el proyecto.
- Se logró desarrollar un método de desratización permanente (las 24 horas, 12 meses del año), que pueda reemplazar a la desratización tradicional.
- Se desarrollaron sistemas alternativos con *hardware* (PRT1, PRT2, PRT3 y PRT4) y *software* (*Smart Control System*), los cuales fueron sometidos a pruebas iniciales.
- Al concluir la fase de laboratorio, se escogieron los prototipos PRT1 y PRT4 por obtener la más alta eficacia y viabilidad para el proyecto. Los prototipos PRT2 y PRT3 fueron descartados por presentar fallas en el ensamblado de *hardware* y un alto costo de los componentes, respectivamente.
- Finalizada la fase de campo, se obtuvo una alta eficacia para los prototipos PRT1 (88.31 %) y PRT4 (90.53 %) en el envío de las alertas al sistema *Smart Control System*. Las fallas en el envío de alertas se debieron a problemas en la cobertura de las señales SMS y WiFi en las localidades de Callao y Lurín, donde se desarrollaron las pruebas.
- Se concluye, sobre la base de la eficacia y el análisis económico, que los prototipos PRT1 y PRT4 son los más adecuados para su comercialización en el mercado nacional. Asimismo, es necesario continuar con las validaciones en campo de estos prototipos para determinar la eficacia en distintas condiciones ambientales.
- El *software Smart Control System*, desarrollado para el proyecto, demostró que registra de manera permanente (las 24 horas) todos los eventos que suceden en el sistema de cebaderos instalados para la desratización en las fábricas agroindustriales.

REFERENCIAS

[1] Andrea, V. (2008). *Desarrollo de software para la simulación espacio-temporal de la dinámica poblacional de roedores transmisores de fiebre hemorrágica*. Recuperado de <https://bit.ly/2OfsKGU>

[2] Anticimex (2016). *Anticimex Smart: Control digital de plagas 24/7*. España: Anticimex. Recuperado de <https://www.anticimex.com/es-ES/smart/>

[3] Atmel Corporation (2016). *ATmega328/P. Datasheet complete*. Recuperado de <https://bit.ly/2FsXRXP>

[4] Chaves, P. (2008). *Sensores analógicos utilizados en la automatización industrial*. Universidad de Costa Rica.

[5] Christopher T., et. al. (2015, 7 de julio) *Wireless notification systems and methods for electronic rodent traps*. Recuperado de <https://www.google.com/patents/US20160192635>.

[6] Decreto Supremo N.º 022–2001-SA. Reglamento sanitario para las actividades de saneamiento ambiental en viviendas y establecimientos comerciales industriales y de servicios. Diario Oficial El Peruano. Lima. Perú, 16 de julio de 2001.

[7] Espressif Systems IOT Team. (2015). *ESP8266EX Datasheet. Versión 4.3*. Recuperado de https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.3.pdf

[8] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura). (2016). *Control de roedores (un resumen). Depósito de documentos de la FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/x5052s/x5052S04.htm>

[9] Fraden, J. (2004). *Handbook of Modern Sensors (Physics, Designs and Applications)* (3ª ed.). San Diego: Springer.

[10] Fundación CTIC. (2016). *¿Qué es el internet de las cosas?* Recuperado de <http://www.fundacionctic.org/sat/articulo-que-es-el-internet-de-las-cosas>

[11] Kramer, M. et. al. (2013, 26 de diciembre). *Wireless Mousetrap and System*. Recuperado de <https://www.google.com/patents/US20130342344>

[12] Pallas, R. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. (3ª ed.). Barcelona: Marcombo.

[13] Sheahan M., y Andrews, P. (2008). Rat Trap [inventors inbox]. *Engineering & Technology*, 3(14), 34-35. Recuperado de <https://bit.ly/2yunoNt>

[14] Ramírez, F. (2015). Área de consolidación gestión de la producción de agroalimentos. *Programa de manejo integrado de plagas para la industria desactivadora de soja* Recuperado de <https://bit.ly/2PpYQwj>

[15] Rentokil (2016). *Radar. Una solución innovadora, discreta y humanitaria para la eliminación de ratones*. Recuperado de <https://bit.ly/2RDpI5>

[16] Resolución Ministerial N.º 449-2001: Norma para la desinsectación, desratización, desinfección, limpieza y desinfección de reservorios de agua, limpieza de ambientes y de tanques sépticos. Diario Oficial El Peruano. Lima. Perú, 26 de julio de 2001.

[17] Wisecon (2015). *Wisebox. Effective control of rats and mice on the surface*. Dinamarca. Wisecon. Recuperado de <http://www.wisecon.dk/en/produktkategori/wisebox-en/>

[18] SIMCom (2013). *SIM 800L Hardware Design V1.00*. Recuperado de http://wiki.seeedstudio.com/images/4/46/SIM800L_Hardware_Design_V1.00.pdf

[19] SIMCom (2013). *SIM 900 Hardware Design V2.05*. Recuperado de http://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900_Hardware%20Design_V2.05.pdf

ACERCA DE LOS AUTORES

Iván Jerí San Miguel

Maestro en Gestión de la Calidad e Inocuidad en la Industria Alimentaria. Investigador principal del área de innovación de la empresa Control de Saneamiento Ambiental S. A. C. dedicada al control de plagas en la industria y salud pública. Ha realizado estudios y publicaciones relacionados con la toxicología en el arroz y la preservación de alimentos vegetales. Docente universitario y auditor líder internacional para sistemas de gestión de inocuidad en los alimentos.

 ivanjeri@controlsac.com

Alfredo Rodríguez Gutiérrez

Ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería, con estudios de maestría en Telecomunicaciones, así como una especialización en Comunicación de datos y maestría en Ingeniería con mención en Gerencia e Ingeniería del Mantenimiento. Docente en la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNI, la UPC y TECSUP.

 arodriguez@uni.edu.pe

Natalie Reynaga Bernaola

Ingeniera de alimentos con estudios de maestría en Tecnología de los Alimentos. Jefa del área de proyectos de la empresa Control de Saneamiento Ambiental S. A. C. Ha liderado estudios de investigación sobre productos para el control de las plagas y toxicología en los alimentos. Es miembro activo del comité de inocuidad alimentaria del Inacal. Docente universitario sobre la gestión de inocuidad en los alimentos.

 calidad@controlsac.com

Jessica Villar Mondalgo

Bióloga con especialización en Microbiología, e Ingeniera Ambiental. Ejecuta validaciones y proyectos de investigación relacionados con el control de las plagas en la industria y salud pública. Jefa del laboratorio de innovación de la empresa Control de Saneamiento Ambiental S. A. C.

 proyectos@controlsac.com



CODIGO

powered by Tecsup />

CodiGo es un programa intensivo de 16 semanas con el que desarrollarás tu talento para contribuir a la transformación digital que hoy requieren las empresas.



Aprende en corto tiempo
una nueva habilidad



Asiste a clases intensivas
y con metodologías ágiles



Empresas evaluarán
tu desempeño



Resuelve casos reales
de empresas

ALIADOS



Las aplicaciones tecnológicas que facilitan la colaboración entre profesores y estudiantes propician mejores desempeños, por lo que hay que involucrar a los alumnos en la utilización de la Pizarras Digitales Interactivas para así fortalecer la relación de tecnología y educación.



Pizarras Digitales Interactivas: ¿Cuáles son los niveles de satisfacción, necesidades y contribuciones desde la mirada de los docentes?

Interactive Digital Whiteboards: What are the Levels of Satisfaction, Needs and Contributions from the Teachers' Point of View?

RESUMEN

La pizarra digital interactiva es una de las innovaciones más novedosas surgidas en los últimos años para mejorar el proceso de enseñanza - aprendizaje. El estudio que se describe tiene como objetivo determinar los niveles de satisfacción de los profesores, en relación al uso de la pizarra digital interactiva (PDI), así como identificar los factores que están relacionados a que los docentes hagan uso de ella.

Se aplicó una metodología mixta, conjugando tanto aspectos cuantitativos como cualitativos, con un diseño no experimental *ex post facto*. Para el levantamiento de datos, se elaboró un cuestionario con 15 ítems tipo Likert y una pauta de entrevista; se encuestó a cien profesores y se entrevistó a doce. Ellos laboraban en el distrito de Mariano Melgar, región Arequipa. El análisis de los datos cuantitativos se realizó mediante la técnica de «análisis de componentes principales» usando una rotación varimax; mientras que el tratamiento de los datos cualitativos, mediante la técnica de «análisis de contenido».

En el análisis de componentes principales se identificaron cuatro dimensiones, las que fueron llamadas: infraestructura, diseño e implementación, estrategias metodológicas y seguimiento, y evaluación, que explican un 67,497 % de la varianza total. Del «análisis de contenido» emergieron tres categorías: desarrollo profesional docente, sostenibilidad y escalabilidad, monitoreo y retroalimentación.

El estudio concluye que existe una percepción positiva vinculada con la componente infraestructura. Sin embargo, se evidenció que la posición de los docentes, frente al diseño, implementación y desarrollo de la iniciativa es bastante desfavorable.

ABSTRACT

The interactive digital whiteboard is one of the most innovative development emerged in recent years to improve the teaching and learning process. The study described aims to determine the levels of satisfaction of teachers, in relation to the use of interactive whiteboard (IDW); as well as identifying the factors that are related to teachers in order to use it. A mixed methodology was applied, combining both quantitative and qualitative aspects, with a non-experimental «ex post facto» design.

For the data collection, a questionnaire with 15 Likert-type items and an interview guideline were elaborated; surveys were applied to one hundred teachers and twelve teachers were interviewed. They worked in the district of Mariano Melgar, Arequipa region. The analysis of the quantitative data was carried out using the «principal component analysis» technique, using a varimax rotation; the qualitative data was processed using the «content analysis» technique.

In the analysis of main components four dimensions were identified, that were called: infrastructure, design and implementation, methodological strategies and monitoring and, evaluation, which explain 67.497% of the total variance. From «content analysis» emerged three categories: teacher professional development, sustainability and scalability, monitoring and feedback.

The study concludes that there is a positive perception, linked to the infrastructure component. However, it was evident that the position of the teachers, compared to the design, implementation and development of the initiative, is quite unfavorable.



Palabras clave

Tecnología, satisfacción usuaria, innovación educativa, estrategias metodológicas, enseñanza y aprendizaje.

Key words

Technology, user satisfaction, educational innovation, methodological strategies, teaching and learning.

INTRODUCCIÓN

La convergencia de las tecnologías de la información y la comunicación (en adelante, TIC) ha generado una profunda transformación en nuestra sociedad. Las TIC son parte integral de nuestros centros de trabajo, instituciones educativas y nuestras viviendas, ellas están cambiando radicalmente la manera en que vivimos, trabajamos, nos divertimos, comunicamos y aprendemos [25] [24]. Existe un creciente interés en el rol que las TIC pueden desempeñar para mejorar los procesos de enseñanza - aprendizaje. Podemos notar un amplio acceso a las TIC en las escuelas y colegios, así como también la importante valoración que los profesores han hecho de estos recursos, lo cual se manifiesta en un alto nivel de incorporación de computadoras e Internet en sus hogares [43] [2].

Frente a este panorama, han surgido importantes iniciativas, especialmente, a nivel gubernamental, regional e institucional con el objetivo de llevar las TIC a las instituciones educativas del país. El distrito de Mariano Melgar, siguiendo la tendencia internacional, y con el apoyo del Ministerio de Educación (Minedu) y Gobierno Regional (GR), decidió incorporar e integrar las pizarras digitales interactivas (en adelante, PDI), en las escuelas y colegios del distrito. El mismo año (2012), y junto con implementar la infraestructura, el Minedu y la Municipalidad de Mariano Melgar se plantearon la necesidad de capacitar a los docentes en el manejo de las PDI. Para la mayoría de los profesores, este era el primer encuentro con ambientes de aprendizaje basados en las PDI, por lo que la capacitación estuvo fuertemente centrada tanto en aspectos técnicos como aspectos pedagógicos. Sin embargo, las capacitaciones fueron relativamente cortas, se confió en las capacidades pedagógicas de los profesores para que ellos desarrollaran la integración de las PDI en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Por otro lado, y a la luz de lo expresado líneas arriba, el uso que se le da a las PDI es bastante acotado. Según la literatura especializada, estas solo producen pequeñas mejoras y aumentos insignificantes en la motivación de los estudiantes [38], y que la motivación inicial despertada por esta nueva tecnología puede ser débil y de corta duración [26] [37]. Para Domingo, la PDI es un recurso más, y pone en alerta que los impactos positivos de la tecnología no vienen automáticamente, mucho depende de cómo los profesores usen las TIC en sus salas de clases [10]. Por esto, es de vital importancia contar con metodologías que permitan la evaluación sistemática del uso de las PDI, para que sus resultados sirvan de base tanto para el mejoramiento de las iniciativas que están en marcha como para la orientación, el diseño y la planificación de futuros proyectos.

En este contexto, esta investigación se orientó en comprender el grado de satisfacción usuaria de profesores, en relación con los entornos de aprendizaje basados en las PDI, así como los factores que están relacionados a que los profesores usen las PDI como recurso de su práctica pedagógica. Así, los objetivos específicos de este estudio son identificar los niveles de satisfacción de los profesores, en relación al uso de las PDI, así como identificar los factores que están relacionados a que los docentes hagan uso de ellas. A través de este estudio, se

buscó responder a las siguientes interrogantes: ¿Cuál es el nivel de satisfacción usuaria de los docentes en relación con los entornos de aprendizaje basados en las PDI? ¿Cuáles son los factores que potencializan o inhiben el uso intensivo de las PDI como recurso pedagógico de los procesos de enseñanza y aprendizaje? Se espera que este estudio constituya un aporte, a la discusión objetiva y productiva en torno a las mejores posibilidades de incorporación e integración de las PDI en contextos educacionales, y que el aporte realizado, a través de esta investigación, constituya, de modo efectivo, la generación de propuestas metodológicas y pedagógicas para facilitar la labor de los docentes.

FUNDAMENTOS

Las evidencias indican que estas políticas de incorporación de tecnología en las aulas han ido en aumento. El uso de los recursos tecnológicos por los jóvenes, en estos tiempos, forma parte de su crecimiento. Para Martín, Beltrán y Pérez la tecnología nos permite variar contextos de aprendizaje y el desarrollo interactivo de los alumnos. De una manera amplia, las TIC se están involucrando en el proceso de aprendizaje con diversas herramientas en diversos temas [28] [12]. En suma, podríamos afirmar que existe la tendencia a la consolidación de una cultura digital en el sistema educativo [19].

No obstante, la incorporación de tecnologías al aula, ha generado controversias y polémica entre funcionarios de la educación, investigadores, especialistas de la educación, profesores y sociedad civil interesada. Existen posiciones extremas, que van desde los que sostienen que las tecnologías revolucionarían la educación [46] hasta los que sostienen que las tecnologías no aportan beneficio alguno y, más bien, causan perjuicios una vez que llegan al aula [27].

En lo que se refiere específicamente a las PDI, diversos investigadores han publicado estudios que proveen sustancial evidencia de que las PDI pueden jugar un rol positivo en el desempeño académico de los estudiantes. Por ejemplo, Toledo y Sánchez, Gadbois y Haverstock indican que las PDI pueden aumentar la interacción entre docentes y estudiantes, así como la motivación y el uso de diferentes puntos de vista del docente. Las PDI pueden ser utilizadas en el aula no solo como herramientas de presentación, sino también como un medio para que los estudiantes puedan desarrollar su propio conocimiento y la organización del mismo [16] [42].

Reafirmando las posiciones anteriores, O'Hanlon sostiene que el uso intensivo de las PDI por estudiantes promueve en ellos la generación de su propio aprendizaje, en particular, en el área de matemáticas y ciencias. Los profesores que emplean las PDI han podido modificar sus prácticas pedagógicas y, en consecuencia, han mejorado sus estrategias metodológicas de enseñanza y aprendizaje [33]. Ellos han realizado cambios radicales en la planificación de sus lecciones, creando sus propios recursos y compartiéndolos en el servidor de la escuela [4]. En esa misma línea, Whyburn y Way se centran en la percepción de estudiantes de primaria y encontró que estos valoraron positivamente el trabajo con las PDI, como el acceso a Internet, música y juegos, lo cual originó que las clases de matemática y ciencias sean más divertidas y motivadoras [46].

Bajo la misma visión, Hennessy desarrolla un marco teórico para comprender el papel mediador de las PDI en el diálogo en el aula. Para él, esta potente tecnología, cada vez más frecuente, abre oportunidades para los estudiantes a generar, modificar y evaluar nuevas ideas, a través de la interacción multimodal junto con la discusión [23].

Sin embargo, también existen opiniones escépticas, quienes sugieren que las PDI solo producen pequeñas mejoras y aumentos insignificantes en la motivación de los estudiantes [38], y que la motivación inicial despertada por esta nueva tecnología puede ser débil y de corta duración [26]. Sad y Ozhan señalan algunas limitaciones de las PDI: las interrupciones y distracciones causadas por problemas técnicos, cortes de energía, falta de conexión a la red, bloqueo provocado por los programas de antivirus y la descalibración de la pantalla [37]. También, una gran limitación es la falta de una estrategia pedagógica y metodológica en la escuela sobre el uso de las PDI [39]. Una de las dificultades que enfrentan los profesores es la necesidad de formación adecuada para usar las PDI en todo su potencial, fundamentalmente, en aspectos metodológicos [40], ya que el asesoramiento recibido en torno a las PDI condiciona su uso pedagógico y, por ende, a sus resultados [45].

Las evidencias indican que estas políticas de incorporación de tecnologías alrededor del mundo han resultado en un dramático incremento en el número de las PDI en escuelas, colegios y salas de clase, y el acceso intensivo de los alumnos y profesores a estos nuevos ambientes de enseñanza y aprendizaje [17]. Pero ¿cuáles son los cambios que las PDI auguran para el mundo de los alumnos y profesores? ¿Cómo se adecuan estos cambios con las necesidades y demandas, de contextos específicos como el caso peruano?

En ese sentido, de la revisión de la literatura podemos concluir que la incorporación e integración de las PDI en la sala de clase es un proceso complejo [20]. La incorporación de las PDI al aula, necesita de más análisis para lograr una mayor comprensión del fenómeno. Así, este estudio es de carácter descriptivo, la metodología adoptó una aproximación mixta de métodos, incorporando tanto aspectos cuantitativos como cualitativos. Cuando las interrogantes de investigación son complejas, la combinación de los métodos permite darle más profundidad, una mayor validez y mayor credibilidad a los hallazgos del estudio [13] [14] [29] [22].

Para el diseño de los instrumentos, es necesario tener bien definida la población de estudio [36]. En este caso, la población de referencia para el diseño de los instrumentos, es el profesorado que tiene acceso a las PDI, del distrito de Mariano Melgar, región Arequipa. Los principales instrumentos de investigación fueron el cuestionario y la entrevista semi-estructurada. Para realizar el análisis de los datos, se recurrió al «análisis de componentes principales» para la dimensión cuantitativa y el «análisis de contenido» para la dimensión cualitativa.

Es preciso señalar que, durante el desarrollo del trabajo, se pudo notar algunas limitaciones. Por una parte, dado que este estudio solo se realizó considerando a los docentes de Mariano Melgar, para futuros estudios, debería considerarse poblaciones más amplias, con el objetivo de obtener resultados más generalizables. Por otro, los instrumentos de

recolección de datos son la entrevista semiestructurada y la encuesta a docentes, estas se centran en el docente y reflejan resultados según su criterio y visión, el cual no necesariamente puede concordar exactamente con lo que realmente realiza en sus prácticas pedagógicas. Por lo tanto, para posteriores análisis en la temática, es necesario complementar con otras estrategias y fuentes de información, que permitan triangular y validar los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA

Esta investigación ha optado por el estudio de casos fundamentado, principalmente, según las propuestas de [41] [18] [48]. Técnica que se caracteriza por buscar una representatividad de conceptos que iluminen el conocimiento sobre algún fenómeno en particular [47]. De esta forma, también, se hace más eficiente la muestra, pues no es necesario llegar a un gran número de escuelas para alcanzar lo que se conoce como el punto de saturación de los estudios, que es el punto en donde los elementos encontrados se repetirán consistentemente, es decir, los sujetos informantes ya no brindan información nueva y relevante [21] [6].

Muestra

Dimensión cuantitativa

Se consideró una muestra censal, es decir, todos los profesores del distrito de Mariano Melgar que incorporaron en sus prácticas pedagógicas las PDI. Se tuvo en cuenta también las directrices del «análisis de componentes principales». Para nuestro caso, el cuestionario contaba con 15 ítems, por lo que necesitábamos, al menos, 75 informantes.

N.º	Género	Número de docentes	N ^{1/}	C ^{2/}
1	Masculino	52	45	7
2	Femenino	48	39	9
		100	84	16

^{1/} N= Nombrado; ^{2/}C= Contratado.

Tabla 1. Características de los docentes.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la información de campo.

Dimensión cualitativa

Se realizó un muestreo teórico, los sujetos informantes fueron profesores que participaron de la capacitación del uso de las PDI. Se identificarán profesores que puedan brindar la mayor información posible sobre el proceso de incorporación e integración de las PDI en sus salones de clase. Los criterios de selección fueron los siguientes: a) profesores que estén dispuestos a ser entrevistados; b) profesores que realicen innovaciones con las PDI; y c) profesores de distinto género y edad. La cantidad de sujetos estará supeditada a la relevancia de la información que proporcionen para la investigación [6].

N.º	Género	Experiencia laboral	Situación laboral ^{1/}
1	Masculino	16	N
2	Masculino	24	N
3	Masculino	35	N
4	Femenino	16	C
5	Masculino	34	N
6	Femenino	17	N
7	Femenino	18	N
8	Masculino	15	N
9	Masculino	8	C
10	Femenino	25	N
11	Masculino	16	C
12	Femenino	28	N

^{1/} N= Nombrado; C= Contratado.

Tabla 2. Características de los docentes.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la información de campo.

Técnicas de recolección de datos

Dimensión cuantitativa

La colecta de datos fue realizada a partir de un cuestionario. El instrumento elaborado tuvo 15 cuestiones cerradas, elaboradas con variables a ser recolectadas a través de una escala tipo Likert de cinco puntos, donde las alternativas varían entre muy insatisfecho y muy satisfecho. Para su elaboración, se consideraron variables en relación a diseño, implementación y desarrollo de la iniciativa, se definieron las siguientes: 1) logística, contexto tecnológico e infraestructural; 2) desarrollo profesional del profesor; 3) sostenibilidad y escalabilidad en el tiempo; y satisfacción de uso por parte del docente. Esta escala, además de ser confiable, y más simple de construir, permite obtener información sobre el nivel de los sentimientos de los informantes [34] [8] [31].

Dimensión cualitativa

Se recurrió a la entrevista semiestructurada como instrumento principal de recolección de datos, pues ella es considerada como una de las «principales técnicas de trabajo en casi todos los tipos de pesquisa utilizados en las ciencias sociales» [3]. La entrevista es utilizada para recoger datos descriptivos en el lenguaje del propio sujeto, lo que permite al investigador desarrollar intuitivamente una idea sobre la manera como los sujetos interpretan diferentes aspectos del mundo [3].

Análisis de los datos

Dimensión cuantitativa

Para el análisis de los datos obtenidos a partir de las cuestiones cerradas, optamos por utilizar el «análisis de componentes principales» (ACP), por considerar que esta técnica: «[...]

Permite identificar patrones o relaciones subyacentes entre varias cuestiones de un instrumento y determinar si la información puede ser condensada o resumida en un conjunto menor de factores o componentes» [1].

Corroborando con la afirmación anterior, Dancey, al describir esta técnica estadística multivariada, sostiene que su principal objetivo es reducir el número de variables para agruparlas, identificando las relaciones entre las diferentes cuestiones presentes en el instrumento de investigación [8]. Para realizar este agrupamiento, utilizamos el *software* estadístico IBM SPSS Statical versión 20. Este, inicialmente, genera agrupamientos jerárquicos, estandarizados y distribuidos, para luego, mediante las operaciones necesarias, obtener los componentes principales [32] [8]. Como estrategia de verificación de la consistencia interna del instrumento, recurrimos al Alfa de Cronbach, que sirve para medir la confiabilidad del cuestionario que se está utilizando.

Inicialmente fue producida la matriz de correlaciones, proceso en el que fue extraído el conjunto de factores. Posteriormente, se determinó el número de factores que deben tomarse (varianza), verificando las cargas de los factores sin rotación (-1 a 1). Después, se calculó la matriz rotacionada con la técnica de varimax, que maximiza las cargas mayores y minimiza las cargas menores [8], y, finalmente, los factores fueron renombrados.

Dimensión cualitativa

Las entrevistas fueron transcritas y analizadas a través del *análisis del discurso* [30] [44]. Esta metodología de análisis fue elegida, principalmente, por que se caracteriza como una metodología que produce y expresa sentidos, permitiendo que el investigador alcance otras formas de interpretación sobre lo que está investigando, a partir de sus conocimientos empíricos y teóricos. Este puede ser definido como «[...] un proceso auto organizado de construcción donde nuevos discernimientos emergen a partir de una secuencia lógica de tres componentes: la deconstrucción de los textos; la unitarización, o establecimiento de relaciones entre los elementos unitarios y la categorización». [30].

Así, los textos sometidos al análisis fueron inicialmente desconstruidos, buscándose unidades de sentido que contuviesen en sí significados importantes para el propósito de la investigación [30]. Las unidades pasaron por un proceso de categorización inicial, seguido de una categorización intermedia, y, finalmente, de una categorización final.

Ética

Se tuvo en cuenta solicitar las autorizaciones necesarias para el ingreso a los colegios, se comunicó en forma clara y precisa los objetivos de la investigación. Los sujetos informantes tienen pleno derecho a conocer cómo se utilizará la información que ellos proporcionan a los investigadores [5] [9] [7]. Con el propósito de proteger el anonimato de los informantes e instituciones educativas que participaron del estudio, se les asignó un código, por ejemplo [ProfC003N007], lo que indica que el informante es del colegio 3 y su número de identificación es el 7.

RESULTADOS

Medición cuantitativa

KMO y prueba de Bartlett

Primero, se comprobó la existencia de intercorrelaciones. Para ello se realizó la prueba de esfericidad de Bartlett, cuya hipótesis nula es que la matriz de correlaciones es una matriz identidad. Para que sea factible realizar el ACP, se precisa que en este test la $p < 0,050$; el test de Kaiser Meyer Olkin (KMO). Para algunos autores, valores por encima de 0.500 ya son aceptables [49] [15]. El valor obtenido de KMO= 0,786; el determinante es casi cero y, la prueba de Bartlett tiene una $p = 0.000 < 0.05$, que nos permite rechazar la hipótesis de matriz identidad. Luego, el diagnóstico es positivo, es decir, que se cumple satisfactoriamente las condiciones para utilizar el análisis de factores y, más específicamente el análisis de componentes principales.

Tests	Resultados
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy	0.786
Approx. Chi-Square	338.667
Bartlett's Test of Sphericity	
df	105
Sig.	0

Tabla 3. Pruebas de KMO y Bartlett.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de resultados del programa SPSS 20.

La confiabilidad del cuestionario, es decir la consistencia interna del instrumento fue estimada mediante el coeficiente de Alfa de Cronbach.

Alfa de Cronbach	Número de ítems
0.894	15

Tabla 4. Coeficiente de Alpha de Cronbach.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados del programa SPSS 20.

El resultado indica un nivel de confiabilidad muy bueno. Cabe resaltar que coeficientes mayores o iguales a 0.70 ya son aceptables y cuanto más se aproximen a 1 son muy confiables. Después de la primera etapa, se realizó un análisis de comunalidades, donde los valores obtenidos fueron por encima de 0,5 mostrándonos la posibilidad de explicar cada una de las variables.

Variables	Inicial	Extracción
Variable 1	1	0.502
Variable 2	1	0.733
Variable 3	1	0.568
Variable 4	1	0.583
Variable 5	1	0.626
Variable 6	1	0.702
Variable 7	1	0.627
Variable 8	1	0.653

Variable 9	1	0.683
Variable 10	1	0.695
Variable 11	1	0.813
Variable 12	1	0.591
Variable 13	1	0.686
Variable 14	1	0.793
Variable 15	1	0.867

Tabla 5. Matriz de componentes rotados.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados del programa SPSS 20.

Varianza total explicada

Se demostró que se tuvo un 67.497 % de variabilidad del conjunto de los datos, con el instrumento adoptado. Del análisis, emergió un número de componentes, los cuales fueron utilizados en la investigación. En total, se agruparon 4 componentes, a los cuales se les atribuyó los siguientes nombres (Tabla 4):

N.º	Componentes
1	Infraestructura
2	Diseño e implementación
3	Estrategias metodológicas
4	Seguimiento y evaluación

Tabla 6. Componentes emergentes.

Fuente: Elaboración propia.

Relación componente matriz

Seguidamente, las variables (cuestiones elaboradas) fueron agrupadas en los componentes de acuerdo con las cargas obtenidas. Así, la variable (cuestión) 11 formará parte del componente 1, pues posee la mayor carga (0,801). Después de realizar el análisis completo, los componentes quedan agrupados de la siguiente manera: para el componente 1, fueron agrupadas las cuestiones 11, 10, 07 y 5; la variable 11 es la que mejor explica el componente 1, es decir, presenta mayor consenso entre los informantes. En el componente 2, fueron agrupadas las cuestiones 4, 9, 3 y 13; en la componente 3, las cuestiones 6, 15 y 14; y en el componente 4, las cuestiones 2, 08, 12 y 1.

Var ⁱ	Componentes			
	1	2	3	4
Var 11	0.801	0.021	0.263	0.320
Var 10	0.764	0.293	-0.159	0.004
Var 7	0.712	0.199	0.253	0.129
Var 5	0.632	0.306	0.265	0.250
Var 4	0.519	0.307	0.262	0.388
Var 9	0.152	0.774	0.043	0.241
Var 3	0.188	0.727	0.039	0.041
Var 13	0.104	0.633	0.494	0.175
Var 6	0.330	0.584	0.472	0.173
Var 15	0.002	0.086	0.894	0.245
Var 14	0.396	0.133	0.786	0.022
Var 2	0.079	0.121	0.181	0.825
Var 8	0.535	-0.073	0.134	0.586

Var 12	0.420	0.301	-0.033	0.569
Var 1	0.142	0.403	0.094	0.557

1/Var=Variables.

Tabla 7. Matriz de componentes rotadas.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de resultados del programa SPSS 20.

En el componente 1, relacionada con la infraestructura tecnológica, el nivel de satisfacción de los profesores es alto, se obtuvo un 47,4 % de docentes satisfechos y 39,1 % de muy satisfechos con los recursos tecnológicos implementados en los colegios (PDI, computadoras de escritorio, *laptops*, proyectores, ecran, recursos TIC, etc.). En el componente 2, relacionada con el diseño e implementación, se encontró un bajo nivel de satisfacción. En la cuestión referente a los plazos de implementación, se obtuvo 35,3 % de satisfacción, más en contraposición se obtuvo 16,5 % que se encuentra poco satisfecho. En cuanto a la logística y planificación de implementación, se obtuvo 45,3 % de indiferencia, solo 12,4 % de la muestra se encuentra satisfecha con esta variable. En el componente 3, relacionada con las estrategias metodológicas, en la cuestión referente a capacitación en nuevas estrategias metodológicas, se obtuvo 16,3 % de docentes satisfechos y 48,3 % de docentes que indican estar muy insatisfechos. En el componente 4, relacionada a seguimiento y evaluación, también el nivel de insatisfacción prevalece, en cuanto al seguimiento y monitoreo, se obtuvo 52,1 % de docentes insatisfechos y 28,7 % muy insatisfechos.

La importancia de conocer las características de los profesores y evaluar sus necesidades dentro de cada contexto, como los entornos tecnológicos y, sus comportamiento y motivaciones hacia ellos, puede influenciar de manera significativa el desempeño de los profesores. A partir de los métodos de evaluación utilizados, fue posible observar que, en general, los profesores están insatisfechos con la forma como se introdujo la tecnología en sus colegios.

Medición cualitativa

En la dimensión cualitativa, a partir de las entrevistas transcritas, producimos 112 unidades, que contenían en sí significados importantes para el propósito de nuestra investigación. Las unidades pasaron por un proceso de categorización inicial, en el cual se determinó 36 categorías. Seguidamente, se procedió a realizar una categorización intermedia, de donde emergieron 12 categorías y, finalmente, tres categorías finales, las cuales se detallan en la tabla 8.

Categoría 1	Desarrollo profesional del docente
Categoría 2	Sostenibilidad y escalabilidad
Categoría 3	Monitoreo y retroalimentación

Tabla 8. Categorías emergentes.

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo profesional docente

En la primera categoría, se identificaron cuestiones tales como falta de actitud de los profesores, rechazo de la PDI por parte de los docentes, cuestión generacional y subutilización de las PDI. El papel del profesor es decisivo para que se lleve a cabo un uso efectivo y eficiente de las PDI. Como lo indica Ortega,

quien quiera saber por qué y en qué forma se utilizan las PDI en el aula debe empezar por esclarecer la importancia que estas tienen para el profesor [35]. El uso de las PDI implica cambios en las actitudes de los profesores que permitan innovar en los procesos de enseñanza - aprendizaje. Estos cambios obligan a romper con las prácticas tradicionales, en las cuales prevalece la clase frontal y el concepto del profesor como un ente rígido. Es decir, los profesores deberían modificar la manera de cómo enseñan a sus estudiantes. No obstante, los profesores sienten que su ambiente de trabajo ha sido modificado como se puede observar en la siguiente declaración: «[...] Que tienes que cumplir con las planificaciones, que tienes que cumplir con evaluaciones, que hay que tener las programaciones... La verdad, con las pizarras digitales, solo nos han traído más trabajo, más obligación, más carga» [sic] [ProfC002N004].

Efectivamente, la apropiación de las PDI por parte de los profesores requiere de nuevos e importantes roles [11]. Un punto fundamental es que los maestros deberían redefinir sus roles tradicionales, aprender a codificar y dosificar las tareas programadas en base a las PDI y, para esto, deberían conocer a profundidad aspectos técnicos como metodologías basadas en las PDI. Probablemente, esto no esté ocurriendo, como puede notarse en la siguiente afirmación de [ProfC001N009]: «[...] Mire usted, me capacitaron un día, y le voy a ser sincero, tengo mucha dificultad para manipular tecnología, los chicos aprenden mucho más rápido que nosotros los viejos, es una realidad y contra eso no podemos hacer nada» [sic].

La introducción de tecnología al aula es un proceso muy complejo y demanda tiempo [50], es por eso que, lejos de imponer su uso a los profesores, deben ser los propios profesores quienes las soliciten cuando lo consideren oportuno de acuerdo con su evolución pedagógica en relación al uso de las TIC en el aula [40].

Sostenibilidad y escalabilidad

En relación con esta categoría, se pudo constatar que el proyecto de las PDI adolece, en su ejecución, de la existencia de una política explícita para la sostenibilidad y escalabilidad. Si bien se pretendió que la educación del distrito de Mariano Melgar marchara de acuerdo con las nuevas tendencias mundiales, pensamos que la motivación principal fue el interés político. Nos basamos en las siguientes declaraciones: «[...] No se trata de imponer, las cosas se deben hacer bien y sino no hacerlas. El alcalde nos ha traído las pizarras, fotos por aquí, fotos por allá, y a la fecha ya se olvidaron, quedaron ahí como un elefante blanco, la capacitación se debió dar en forma escalonada, de menos a más, pero no vinieron un día. Si mal no recuerdo, nos capacitaron por espacio de 4 horas y eso fue todo, así no se trabaja, señor». [sic] [ProfC010N003].

Probablemente, el proyecto en el distrito de Mariano Melgar no haya tenido en cuenta la sostenibilidad y la escalabilidad en el tiempo. La percepción de que no hay beneficios es una de las áreas más complejas en relación con las actitudes de los profesores hacia las PDI. Estos requieren tener muy claros los beneficios que obtienen de las pizarras digitales para su labor pedagógica [37]. Lo anterior se sustenta en la declaración del informante [ProfC002N012]: «[...] El tema no tiene futuro, no hubo una planificación, no se pensó seriamente. Esto debió ser un trabajo serio a largo plazo, nada de eso existe [...] pedimos recursos, nunca existen. Solicitamos que venga personal a

enseñarnos cosas puntuales sobre el uso de las pizarras, solo nos toman la palabra, como ya le dije, esto de las pizarras fue un saludo a la bandera y nada más» [sic].

La planificación y la proyección en el tiempo aparecen aquí como un aspecto central, pues en el análisis de las entrevistas apareció como concepto de categoría recurrente y como uno de los criterios de mayor relevancia para los profesores. Una gran mayoría de ellos confirma la inexistencia de metas claras y precisas en el tiempo. Como lo podemos apreciar en la siguiente expresión: «[...] a la deriva, todo esto está a la deriva, no veo un norte, no se ve un objetivo claro a donde se quiere llegar, pareciera que solo fue interés electoral. Ahora estas pizarras nos complican todo, tienes que preparar material, tienes que buscar recursos, entonces yo llevo a la conclusión que todo esto solo ha sido novedad de un día» [sic] [ProfC009N011].

Aunque muchos profesores reconocen la importancia de usar las pizarras en el desarrollo de sus prácticas pedagógicas, numerosas barreras pueden bloquear sus esfuerzos de implementación, las que van desde los miedos personales («¿Qué debería hacer si las PDI falla y mi clase se detiene?», «¿Cómo debería obtener la confianza que necesito?») hasta lo concerniente a cuestiones organizacionales y pedagógicas («¿Cómo puedo asegurar que los estudiantes logren pericia con las PDI sin descuidar otros contenidos importantes?», «¿Cómo puedo integrar las PDI dentro de las demandas actuales del currículo?»).

Monitoreo y retroalimentación

La posibilidad de contar con pizarras interactivas digitales para mejorar la calidad de la educación pública del distrito de Mariano Melgar constituía una de las principales expectativas de los profesores beneficiarios que, según la mayoría de ellos, no ha sido cumplida en la medida de lo esperado, pues los directamente responsables no han cumplido con lo inicialmente ofrecido. Justificamos nuestra afirmación con la siguiente declaración: «Nos prometieron capacitación constante y retroalimentación, pero nada de eso ha ocurrido, estamos a la deriva; el alcalde nos ofreció visitas permanentes de especialistas, nos dijo que siempre íbamos estar acompañados de personal que nos iba a guiar, pero no. Es lamentable que se despilfarre los pocos recursos que se tiene, habiendo tantas otras necesidades más básicas» [sic] [ProfC005N006].

Más aún, el temor a las tecnologías, sus creencias negativas, su condición de no nativo de la tecnología y su rechazo al cambio de actitud constituyen limitaciones docentes preponderantes para la integración de las PDI al aula. En síntesis, los profesores todavía no generan grandes cambios a nivel pedagógico y tampoco saben cómo realizar un proceso de reflexión sobre su desempeño utilizando las PDI.

En síntesis, las PDI no se han explotado lo suficiente en la creación de nuevos ambientes de aprendizaje. La mayoría de los docentes sostiene, que tanto el Ministerio de Educación, el municipio de Mariano Melgar y las mismas instituciones educativas, no se han involucrado lo suficiente. Como lo sostienen Zucker y Bonifaz, es de primordial importancia proveer capacitación, desarrollo profesional, monitoreo y principalmente sobre la integración curricular de la tecnología, y no solo sobre habilidades técnicas [51].

CONCLUSIONES

- Las conclusiones de este estudio se presentan en función de las interrogantes que guiaron la investigación y los objetivos propuestos. Se puede señalar, en términos generales, que la opinión de satisfacción de los usuarios de las PDI ha sido negativa y desfavorable, básicamente, en las componentes: diseño e implementación, estrategias metodológicas, y seguimiento y evaluación.
- Los resultados indican que existe una percepción positiva, vinculada con el componente «infraestructura». A los profesores se les impone la idea de que las tecnologías deben ser parte integral de las actividades de sus clases. Pero aún es un desafío fundamental para muchos profesores el cómo usar la tecnología en la creación de nuevos ambientes de aprendizaje, especialmente, para los docentes de mayor edad. Además, en el caso de las PDI, no se involucra un simple tipo de equipo, sino una variedad de computadoras de escritorio y personales, redes de computadoras, cámaras digitales, proyectores LCD y PDA (asistentes digitales personales), la implementación de estas innovaciones toma tiempo y recursos.
- Consideramos entre las principales dificultades que presenta el programa de las PDI en los colegios la carencia de un proyecto o plan de trabajo sobre la incorporación e integración de las PDI al currículo escolar. Esto incluiría acciones como uso responsable de la red, mantención de los equipos, adquisición de aplicaciones para su mejor utilidad, soporte técnico y, lo más importante, la actualización constante de los docentes para su manejo de las PDI. Todos estos aspectos son minimizados por los funcionarios de la educación.
- Con respecto a los docentes, la falta de dominio técnico y, principalmente, metodológico no permite realizar un verdadero trabajo con las DPI debido a que hay una despreocupación en la mayoría de ellos por no actualizarse de manera voluntaria, quizás sea por los costos de los cursos, disposición de tiempo, o de considerarse autosuficientes, etc. Tengamos en cuenta que la actitud del docente cumple aquí un papel muy importante frente a su labor profesional y esta no se debe de tomar a la ligera.
- En muchas circunstancias, el docente rechaza el cambio de sus prácticas pedagógicas por ambientes tecnológicos. Nos atrevemos a decir que quienes están más predispuestos al uso de tecnología son aquellos docentes que han tenido una formación profesional paralelamente con el avance tecnológico, generalmente, son los que recién han egresado (muchos de ellos contratados), que son opacados por docentes de mayor antigüedad en los colegios (nombrados). Tengamos en cuenta que 45 % los docentes poseen grados académicos como magíster (mayoría) o doctores (algunos), y no conllevan a un aporte para el desarrollo del colegio. Probablemente, estos fueron obtenidos solo para el ascenso magisterial.
- A manera de aporte, nos permitimos realizar las siguientes recomendaciones: que cada colegio convoque un equipo de trabajo, el cual tenga la responsabilidad de capacitar a los

docentes sobre el uso de las PDI, tener un soporte técnico constante para las PDI, monitorear y evaluar el trabajo de los docentes, formar grupos de trabajo por áreas (Matemática, Comunicación, Ciencias, etc.), que puedan elaborar material didáctico (sesiones, bibliografía, rubricas, etc.) para usarlas con las PDI.

- Las aplicaciones tecnológicas que facilitan la colaboración entre profesores y estudiantes propician mejores desempeños, por lo que hay que involucrar a los alumnos en la utilización de la PDI para que así se fortalezca la relación de tecnología y educación, y no tecnología y distracción. Sobre los docentes, debe existir una entrega abnegada y desinteresada por el cambio de actitud con las PDI y usar en su plenitud todas funciones que tiene. A la vez, remarcamos que no se pretende desmerecer la función del docente teniendo en cuenta que la tecnología les brinda herramientas de apoyo, pero sería egoísta de su parte mantenerse al margen de los avances tecnológicos, más aún sabiendo que en esos contextos son en los que se desarrollarán sus estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] Almeida, T., Pinto, S., y Piccolo, H. (2007). *Auto-Avaliação na fundação Universidade Federal do Rio Grande: Metodologia de Avaliação*. Avaliação Campinas: Sorocaba, SP.
- [2] Anaya, P., Poblete, A. (2017). *Barreras y facilitadores para el uso de las TIC en una muestra de profesores del subsector biología de establecimientos educacionales de la ciudad de Los Ángeles* (seminario de título para optar al título profesional, Universidad de Concepción).
- [3] André, M., Ludke, M. (1986). *Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas*. São Paulo: E. P. U.
- [4] BECTA (2007). *Evaluation of the Primary Schools Whiteboard Expansion Project*. Recuperado de <https://bit.ly/1MOyIOj>
- [5] Belmont, R. (1979). *Informe Belmont. Principios éticos y normas para el desarrollo de las investigaciones que involucran a seres humanos*. Recuperado de <https://bit.ly/2pTAIMG>
- [6] Bogdan, R., Bilken, S. (1982). *Qualitative reserach for Education: an instroduction to theory and methods*. Boston: Allyn and Bacon.
- [7] Cantalejo, I., y Lorda, P. (2005). *Problemas éticos de la investigación cualitativa*. Granada: Fundación Hospital de las Nievas.
- [8] Dancey, C. (2006). *Estatística sem matemática para psicologia*. Porto Alegre: Artmed.
- [9] Di Conza, J., Quiroga, C. (2013). Las responsabilidades éticas en la publicación de artículos científicos. *Revista Argentina de Microbiología*. 45(4), 219-221.
- [10] Domingo, M. (2011). Pizarra Digital Interactiva en el aula: Uso y valoraciones sobre el aprendizaje. *Interactive Whiteboard in the Classroom: Use and Evaluation of Learning*, vol. (20). 99-116
- [11] Duan, Y. (2010). Teaching interactively with Interactive Whiteboard: Teachers are the key. *Networking and Digital Society (ICNDS), 2.ª International Conference, 1*, 144-147.
- [12] Feicht, L. (2000). Guess and Check: Aviable problem-solving strategy. *Learning & Leadingwith, Technology*, 27 (5), 50 – 54.
- [13] Field, A. (2009). *Descobrimdo a Estatística usando o SPSS; tradução Lori Viali*. (2.ª ed.) Porto Alegre: Artmed.
- [14] Flick, U. (2009). *Qualidade na pesquisa qualitativa*. Porto Alegre: Artmed.
- [15] Friel, C. (2009). Notes on Factor Analysis. *Criminal Justice Centre*, Sam Houston State University.
- [16] Gadbois, S., Haverstock, N. (2012). Middle Years Science Teachers Voice Their First Experiences With Interactive Whiteboard Technology. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 12(1), 121-135
- [17] Gallego, J., Cacheiro, A., Maria, L., Dulac, J. (2009). La pizarra interactiva como recurso docente, teoría de la educación. *Educación y cultura en la Sociedad de la Información*, 10(2), 127-145.
- [18] Gil, A. (2010). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (5.ª ed.) São Paulo: Atlas.
- [19] Gonzáles, A., De Pablos, J. (2015). Factores que dificultan la Integración de las TIC en las Aulas. *Revista de Investigación Educativa*, 33(2), 401-417.
- [20] González, L., Recamán, A., González, C. (2013). La dimensión colaborativa con TIC en la dirección de centros. *REIFOP*, 16(1), 147-162.
- [21] Glaser, B., Strauss, A. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Chicago: Aldine.
- [22] Hamui-Sutton, A. (2013). Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica. *Departamento de investigación educativa. Universidad Nacional Autónoma de México*. 2(8), 211-216.
- [23] Hennessy, S. (2011). The role of digital artefacts on the interactive whiteboard in supporting classroom dialogue. *Journal of Computer Assisted Learning*, 27, 463-489.
- [24] Hepp, P., Pérez, M., Aravena, C., Zoro, B. (2017). *Desafíos para la integración de las TIC en las escuelas: implicaciones para el liderazgo educativo. Informe técnico N.º 22017*. Santiago de Chile: Líderes educativos, Centro de Liderazgo para la Mejora Escolar.

- [25] Kozma, R., McGhee, R. (2003) ICT and innovative classroom practices. En *Technology, Innovation and Educational Change* 43-80. Eugene: International Society for Technology in Education.
- [26] Levy, P. (2002). *Interactive whiteboards in learning and teaching in two Sheffield schools: A developmental study*. Sheffield: Sheffield Excellence in Cities Partnershi.
- [27] Malamud, O., Pop-Eleches, C. (2011). Home Computer Use and the Development Human Capital. *Quarterly Journal of Economics*. 126(2), 987-1027.
- [28] Martín, J., Beltrán, J., Pérez, L. (2003). *Como aprender con internet*. Madrid: Foro pedagógico de internet.
- [29] Molina, J., López, M., Pereira, J., Pertusa, E., y Tarí, J. (2012). Métodos híbridos de investigación y dirección de empresas: Ventajas e implicancias. *Cuadernos de economía y dirección de empresas*. Universidad de Alicante, 15, 55-62.
- [30] Moraes, R., Galiazzi, M. (2007). *Análise textual discursiva*. Ijuí: Unijuí.
- [31] Miquel, S., Bigne, E., Levy, J., Cuenca, A., Miquel, M. (1996). El cuestionario. Escala y técnicas de medida. En *Investigación de Mercados*. Madrid: McGrawHill.
- [32] Neto, J., Moita, G. (1998). Uma introdução á análise exploratória de dados multivariados. *Química Nova*, 21(4).
- [33] O'Hanlon, Ch. (2007). *BoardCertified*. Recuperado de <http://thejournal.com/Articles/>.
- [34] Oliveira, T. (2001). Escalas de Mensuração de Atitudes: Thurstone, Osgood, Stapel, Likert, Guttman, Alpert. *FECARP. FundaçãoEscola de Comércio*, 2(2).
- [35] Ortega, M. (2006). *Propuesta de introducción en el currículum de las competencias de la educación*. ILPE-UNESCO. Recuperado de <https://bit.ly/2P2jDsO>
- [36] Rodríguez, G., Gil, J., García, E. (1999). Cuestionario. Aspectos básicos sobre el análisis de datos cualitativos En *Metodología de la investigación cualitativa*. (2.ª ed). Granada: Editorial Aljibe. 185-216.
- [37] Sad, S., Özhan, U. (2012). Honeymoon with IWBs: A qualitative insight in primary students' views on instruction with interactive whiteboard. *Computers & Education*, 59, 1184-1191.
- [38] Solvie, P. (2004). The Digital Whiteboard: A Tool in Early Literacy Instruction. *The Reading Teacher*, 57(5), 484-487.
- [39] Somyurek, S., Atasoy, B., Ozdemir, S. (2009). Board's IQ: What makes a board smart? *Computers&Comupters*, (53), 368-374.
- [40] Slay H., Hodgkinson, Ch. (2008). Interactive whiteboards: Real beauty or just "lipstick"? *Computers &Education*, (51), 1321-1341.
- [41] Stake, R. (1999). *Investigación con estudio de casos*. (2ª ed.) Madrid: Ediciones Morata. S. L.
- [42] Toledo, P., Sánchez, J. (2013). Utilización de la pizarra digital interactiva como herramienta en las aulas universitarias. *Apertura*, 5(1), 20-35
- [43] Thomas, G. (2008). *Elements of a national strategy to foster effective use of technology in elementary and secondary education*. California: RAN Corporation.
- [44] Urra, E., Muñoz, A., Peña, J. (2013). El análisis del discurso como perspectiva metodológica para investigadores de salud. *Enfermería universitaria*. *ELSEVIER*, 10(2), 50-57.
- [45] Vincent, J. (2007). The interactive whiteboard in an early years classroom: A case study in the impact of a new technology on pedagogy. *Australian educational computing*, 2, 20-25.
- [46] Whyburn, L., Way, J. (2012). Student perceptions of the influence of IWBs on their learning in mathematics. *Australian Educational Computing*, 27(1), 23-27.
- [47] Yin, R. (2001). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Trad. Daniel Grassi. (2.ª ed.) Porto Alegre: Bookman.
- [48] Yin, R. (2002). *Case Study Research II: Design and Methods*. (3.ª ed). Nueva York: Sage Publications.
- [49] Zamora, S., Monroy, L., Chávez, C. (2009). *Análisis factorial: una técnica para evaluar la dimensionalidad de las pruebas*. *Cuaderno técnico 6*. México D. F.: Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior. A. C.
- [50] Zhao, Y., Pugh, K., Sheldon, S., y Byers, J. (2002) Conditions for Classroom Technology Innovations. *Teachers College Record*. 104(3), 482-515.
- [51] Zucker, A., Bonifaz, A. (2005) *Lessons Learned About Providing Laptops For All Students*. NEIRTEC. Boston: SRI International.

ACERCA DE LOS AUTORES

Carlos David Laura Quispe

Posdoctorando en educación por la Universidad Federal de Uberlândia (UFU), Brasil. Magíster en Informática Educativa por la Universidad de la Frontera (UFRO), de Chile y en Educación, por la Universidad Federal de Río Grande (FURG), Brasil. Licenciado en Ciencias de la Educación, especialidad Físico Matemático por la Universidad Nacional San Agustín (UNSA) y economista por la Universidad Nacional San Agustín (UNSA). Ha laborado en el Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES), en la Universidad Católica Santa María (UCSM) y en la Universidad Federal de Río Grande (FURG), Brasil. Es parte del comité científico de arbitraje de las revistas *Góndola enseñanza y aprendizaje de las ciencias*, de Colombia y de la revista *Ciencia, Docencia y Tecnología* de Argentina.

@ cdavidlaura@gmail.com

Luis Alberto Almanza Ope

Es Licenciado en Literatura y Lingüística por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, se desempeña como docente de educación superior en universidades e institutos. En la actualidad, labora en Tecsup Sede Sur. Además, es también asesor educativo en diversas entidades educativas y municipalidades de Arequipa. Especialista en investigación científica, metodología del estudio, crítico literario, autor de libros de pedagogía, didáctica educativa, y escritor de poesía y novela. Ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales de innovación educativa como Portugal, España, Argentina, México, Brasil, Cuba, Colombia y Perú.

@ lalmanza@tecsup.edu.pe

AGRADECIMIENTOS

A Tecsup, Sede Sur, a la Municipalidad de Mariano Melgar de Arequipa y a la Universidad Federal de Uberlândia (UFU) del estado de Minas Gerais en Brasil.

34

AÑOS FORMANDO Y
CAPACITANDO LÍDERES
EN TECNOLOGÍA

Nuestros egresados son profesionales muy valorados en importantes empresas de diversos sectores a nivel nacional y mundial. Según el portal Ponte en Carrera, seis de las diez carreras mejor pagadas en el país son nuestras. Contamos con docentes experimentados en su campo, además de modernos laboratorios y talleres.

Somos pioneros en educación *online* con cursos enfocados en tecnología. En los últimos 10 años, más de 100 mil personas y empresas han confiado en nuestros cursos y programas de extensión.

- ✓ Programas de Alta Especialización Profesional
- ✓ Carreras técnicas
- ✓ Venta corporativa
- ✓ Carreras profesionales
- ✓ Cursos y programas de extensión
- ✓ Cursos *online*
- ✓ Maestrías internacionales - CEPADE
- ✓ Seminarios y simposios

CAPACÍTATE **DONDE** **Y CUANDO** **QUIERAS**

CURSOS Y PROGRAMAS
100 % VIRTUALES



Electricidad y Electrónica



Mecánica y Aviación



Tecnología Agrícola



Gestión y Producción



Mecatrónica



Tecnología Digital



**Seguridad y Salud
en el Trabajo**



**Minería, Procesos
Químicos y Metalúrgicos**

Tecsup Virtual

INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

La revista *Investigación Aplicada e Innovación I+i* es publicada anualmente y tiene como objetivo principal difundir trabajos de investigación aplicados a la ingeniería y tecnología, con el fin de apoyar al sector productivo en la mejora de sus procesos, eficiencia de sus procedimientos e incorporación nuevas técnicas para fortalecer su competitividad. Las principales áreas temática son: Innovación y Gestión Educativa, Automatización Industrial, Aviónica, Electrotecnia, Electrónica, Energía, Química y Metalúrgica, Gestión y Administración Industrial, Mantenimiento Industrial, Operaciones Mineras, Tecnología Agrícola, Tecnología de la Producción, Tecnología Mecánica Eléctrica, Seguridad e Higiene Ocupacional, Tecnología de Información y Comunicación.

Dirigido a:

Profesionales en ingeniería y tecnología, investigadores, docentes de educación superior, directivos académicos y especialistas en cualquiera de las temáticas que aborda la revista.

Convocatoria:

Los interesados en publicar en la Revista I+i de Tecsup, deben enviar sus artículos de investigación al siguiente correo electrónico: investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe

Requisitos para la publicación

1. Formato de presentación:

- Se aceptarán artículo escritos en idioma español, portugués o inglés.
- El artículo debe tener una extensión entre 7 y 14 páginas escritos a una sola columna.
- El interlineado será sencillo, fuente Tahoma o Arial, tamaño 11 puntos.
- Todos los márgenes son de 2.5 cm en tamaño de página A4.
- El artículo debe enviarse en formato Word, además de la versión en PDF.
- Las tablas, figuras y gráficas deberán incluirse con buena resolución y presentarse según los lineamientos de las normas APA.
- Las ecuaciones deben estar bien definidas, digitadas y no presentadas como imágenes.

2. Estructura del artículo:

- **TÍTULO:** Se colocará el título de la investigación en el idioma original y en inglés. El título no debe exceder de 12 palabras y debe dar cuenta del objeto de investigación.
- **AUTORES:** Es necesario nombres y apellidos completos de los autores y su afiliación académica e institucional.
- **RESUMEN:** Contenido breve del artículo en el idioma original e inglés, no debe exceder las 300 palabras. Evitar el uso de siglas, ecuaciones, tablas y fórmulas.
- **PALABRAS CLAVES:** Identifica los temas principales del artículo redactados en el idioma original e inglés y presentados en orden de prioridad, no exceder de 08 palabras claves.
- **INTRODUCCIÓN:** Explicar el problema general, definir el tema investigado y los objetivos del estudio.
- **FUNDAMENTOS:** Presentar los antecedentes que fundamentan el estudio haciendo uso de citas según las Normas APA. Describir el estudio de la investigación incluyendo premisas y limitaciones.
- **METODOLOGÍA:** Explicar cómo se llevó a la práctica el trabajo, justificando la elección de procedimientos y técnicas.
- **RESULTADOS:** Resumir la contribución del autor; presentar la información hallada y pertinente que se relaciona con los objetivos del estudio en forma comprensible y coherente; mencionar todos los hallazgos relevantes, incluso aquellos contrarios a la hipótesis.
- **CONCLUSIONES:** Inferir o deducir una verdad de otras que se admiten, demuestran o presupone. Las conclusiones deben estar acorde a los objetivos del trabajo, responden a la(s) pregunta(s) de investigación planteadas en la introducción y a las interrogantes que condujeron a la realización de la investigación.
- **REFERENCIAS:** Incluir todas las fuentes mencionadas en el artículo. Es necesario el uso de referencias de autoridad y de carácter académico. Se debe incluir documentos de actualidad incluidos en bases de datos especializadas. Su presentación es bajo el formato una adaptación de las Normas APA para la revista I+i.
- **ACERCA DEL AUTOR(ES):** Incluir Información profesional breve de cada autor (institución y labor que desempeña).

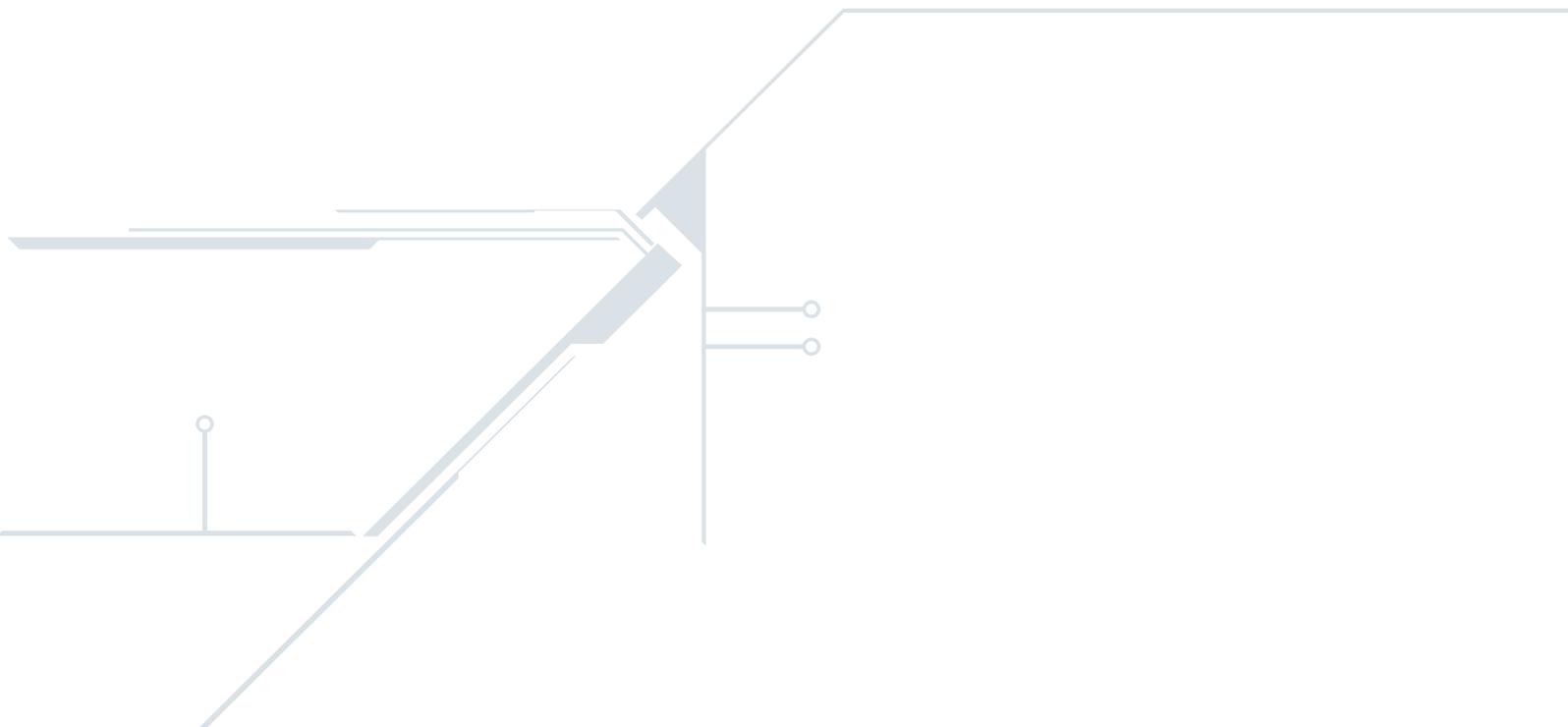
3. Selección y publicación de artículos:

- Se realiza la recepción y revisión de los resúmenes para verificar si el artículo aborda alguna de área temática de la revista.
- Tras la aceptación del resumen se solicita el documento completo para que el Comité Editorial revise el cumplimiento del formato y estructura de presentación. También se valida si el trabajo es inédito.
- Se verifica la originalidad del artículo a través de la herramienta Turnitin para luego realizar la revisión de contenido.
- El sistema de revisión de contenido está a cargo de dos especialistas en el tema, quienes opinan si el artículo es:
 - *Publicable sin modificaciones:* El trabajo no tiene ningún tipo de observación de fondo y se publica como fue recibido.
 - *Publicable con ligeras modificaciones:* El trabajo amerita fundamentalmente modificaciones de forma.
 - *Publicable con modificaciones sustanciales:* El trabajo amerita algunas modificaciones de fondo corregibles.
 - *No publicable:* el artículo no es recomendable para su publicación.
- Los artículos aceptados continúan con un proceso de corrección de texto y estilo.
- Concluidos todos los procesos de revisión se procede con la diagramación e impresión de la revista.

Para más información puede revisar el sitio web de la *Revista I+i* en: <https://www.tecsup.edu.pe/>



Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de
Tarea Asociación Gráfica Educativa
Pasaje María Auxiliadora 156 - Breña
Correo electrónico: tareagrafica@tareagrafica.com
Página web: www.tareagrafica.com
Teléf. 332-3229 Fax: 424-1582
Noviembre, 2018
Lima - Perú



Tecsup

Sede Norte

Mz. A Sub lote 1 Urb. Tecsup
Victor Larco Herrera, Trujillo - Perú
informestrujillo@tecsup.edu.pe

T. (044) 485420

Sede Centro

Av. Cascanueces 2221
Santa Anita, Lima 43 - Perú
informeslima@tecsup.edu.pe

T. (51-1) 317-3900

Sede Sur

Urb. Monterrey Lote D-8
José Luis Bustamante y Rivero,
Arequipa - Perú
informesarequipa@tecsup.edu.pe

T. (54) 426610

F. (54) 426654

www.tecsup.edu.pe

